



## Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2014



## Statustagung Maritime Technologien

Tagungsband der Statustagung 2014

Schriftenreihe Projektträger Jülich

## Grußwort



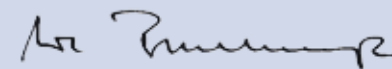
Maritime Technologien spielen bei zentralen Zukunftsfragen eine wichtige Rolle: Von der Rohstoffversorgung über die Energieerzeugung bis hin zu Transport und Logistik gewinnt die Nutzung der Meere an Bedeutung. Eine wesentliche Basis für die technologische Leistungsfähigkeit des maritimen Sektors in Deutschland stellen die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen aus Wissenschaft und Wirtschaft dar. Hierdurch sichern wir unsere internationale Wettbewerbsfähigkeit und tragen zu Wachstum und Beschäftigung bei.

Nur durch hochwertige, technisch anspruchsvolle Produkte und Dienstleistungen kann die Stellung der deutschen Unternehmen gefestigt und ausgebaut werden.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) stellt daher für Investitionen in Forschung und Entwicklung unter anderem Mittel im Programm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ zur Verfügung.

Auch die diesjährige Statustagung und der begleitende Tagungsband vermitteln wieder interessante Einblicke in aktuelle Forschungsaktivitäten. Die Präsentationen zu Projekten aus den Bereichen Schiffbau, Schifffahrt sowie Meerestechnik beleuchten neben technischen Aspekten auch die Perspektiven der Verwertung und des Praxistransfers. Es erwarten Sie Beiträge zum Umweltschutz, zur maritimen Sicherheit sowie zu neuen Unterwassertechnologien.

Ich wünsche Ihnen viele gute Anregungen und Freude beim Lesen dieses Tagungsbandes.



Uwe Beckmeyer, MdB

Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Wirtschaft und Energie und Maritimer Koordinator der Bundesregierung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Für den Inhalt und das Bildmaterial der einzelnen Beiträge tragen die Autoren die Verantwortung.

Alle Vorhaben, zu denen im vorliegenden Band Beiträge veröffentlicht sind, wurden im Programm „Maritime Technologien der nächsten Generation“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Der Tagungsband wurde aus Projektfördermitteln des BMWi finanziert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

#### Herausgeber und Vertrieb

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Zentralbibliothek, Verlag  
D-52425 Jülich  
Telefon 02461 61 - 53 68  
Telefax 02461 61 - 61 03  
E-Mail [zb-publikation@fz-juelich.de](mailto:zb-publikation@fz-juelich.de)  
Internet [www.fz-juelich.de/zb](http://www.fz-juelich.de/zb)

#### Satz und Layout

Kristina Ehrhardt, Projektträger Jülich

#### Bildnachweis

IMPAC, Fa. Sadler Imageworks (Hamburg)

#### Druck

Druckerei Mainz, Aachen

Schriftenreihe Projektträger Jülich

ISBN 978-3-95806-006-7

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JUWEL)  
unter [www.fz-juelich.de/zb/juwel](http://www.fz-juelich.de/zb/juwel)

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

## Inhaltsverzeichnis

<b>FAME – Kraftstoff- und Sauerstoffmanagement zur Emissionsreduzierung</b> .....	9
Carsten Rickert (Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG), Moritz Frobenius (AVL Deutschland GmbH), Hartmut Schneider (L'Orange GmbH), Christian Fink (LKV Universität Rostock), Roland Pittermann (WTZ Roßlau gGmbH)	
<b>BossCEff – Steigerung des Propulsionswirkungsgrades durch Reduktion von Nabenwirbelverlusten</b> .....	25
Lars Greitsch, Robert Pfannenschmidt (Mecklenburger Metallguss GmbH), Moustafa Abdel-Maksoud, Markus Durckbrod (Technische Universität Hamburg-Harburg), Hans-Jürgen Heinke (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam)	
<b>LESSEO – Untersuchung der Lecksicherheit von Schiffen unter besonderer Berücksichtigung des zeitabhängigen Sinkverhaltens und dynamischer Einflüsse aus großen freien Oberflächen</b> .....	37
Florian Kluwe (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG), Oliver Lorkowski (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG), Stefan Krüger (Technische Universität Hamburg-Harburg), Hendrik Dankowski (Technische Universität Hamburg-Harburg)	
<b>AKTOS – Aktive Kontrolle von Torsionsschwingungen durch Kupplungselemente</b> .....	49
Dipl.-Ing. Jochen Exner (CENTA Antriebe GmbH, Haan) Dr. Ing. Mahamudul Hasan (CENTA Antriebe GmbH, Haan), Dipl.-Ing. Daniel Schlote (Fraunhofer LBF, Darmstadt)	
<b>PREMAN – Maßstabseffekte und Umwelteinflüsse bei der Vorhersage des Manörierverhaltens seegehender Schiffe</b> .....	53
A. Cura Hochbaum, J. Schwarz-Beutel, L. Koopmann (TU Berlin), O. el Moutar, J. Höpken, U. Lantermann (Universität Duisburg-Essen), J. Lassen (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH)	
<b>MoVer – Entwicklung eines modularen Verfahrens zur umfassenden Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Schiffen in Richtungsseegängen</b> .....	71
Dr. Katja Jacobsen, HSVA – Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt	
<b>IRO 2 – Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung</b> .....	87
Nils Reimer (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH), Prof. Dr. Lars Kaleschke (Universität Hamburg), Dr. Mikhail Dobrynin (Universität Hamburg)	
<b>SUGAR II – Submarine Gashydrat-Lagerstätten, Erdgasproduktion und CO<sub>2</sub>-Speicherung</b> .....	103
Prof. Dr. Klaus Wallmann (GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel) und das SUGAR Konsortium	

## **SOTLL – Sideways Offshore Transfer of LNG and LPG . . . . . 117**

Christian Frohne (Nexans Deutschland GmbH),  
Christian Reiter (Nexans Deutschland GmbH),  
Sven Hoog (IMPAC Offshore Engineering GmbH, Hamburg),  
Johannes Myland (IMPAC Offshore Engineering GmbH, Hamburg),  
Joern Homann (Brugg Rohrsysteme, Wunstorf),  
Oliver Herbst (Brugg Rohrsysteme, Wunstorf),  
Günther Clauss (Technische Universität, Berlin),  
Sven Stuppe (Technische Universität, Berlin),  
Matthias Dudek (Technische Universität, Berlin)

## **BioBind – Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern . . . . . 131**

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff (Univeristät Rostock,  
Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau),  
M.Sc. Marcus Siewert (Univeristät Rostock,  
Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau),  
Dr. Martin Powilleit (Univeristät Rostock,  
Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau)

## **EPES: Effiziente Prognose vibroakustischer Eigenschaften in der Schiffsentwurfsphase . . . . . 145**

Stephan Lippert (Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Institut für Modellierung und Berechnung, Projektkoordinator EPES)  
Bernd Stritzelberger (Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Institut für Modellierung und Berechnung)  
Otto von Estorff (Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Institut für Modellierung und Berechnung, Projektleitung EPES)  
Robin Seiler (Technische Universität Berlin,  
Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme)  
Sebastian Mathiowetz (Technische Universität Berlin, Fachgebiet Technische Akustik)  
José Luis Barros (Technische Universität Berlin,  
Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme sowie Fachgebiet Technische Akustik)  
Gerd Holbach (Technische Universität Berlin,  
Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme)  
Julia Groß (Technische Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik)  
Joachim Bös (Technische Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik)  
Marius Karger (Novicos GmbH)  
Olgierd Zaleski (Novico GmbH)  
Christoph Tamm (Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit)  
Heiko Krüger (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft)  
Bastian Ebeling (ThyssenKrupp Marine Systems, Surface Vessels)  
Insa Bech (ThyssenKrupp Marine Systems, Surface Vessels)  
Norbert Hövelmann (ThyssenKrupp Marine Systems, Submarines)  
Wolfgang Sichermann (ThyssenKrupp Marine Systems, Surface Vessels)  
Nils Reichstein (Fr. Lürssen Werft)  
Bernhard Urban (Fr. Lürssen Werft)

## **ReFIT – Refitting Ships for Improved Transport Efficiency . . . . . 163**

Mattia Brenner (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam)  
Stefan Harries (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam)  
Stefan Wunderlich (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam)

## **FAME – Kraftstoff- und Sauerstoffmanagement zur Emissionsreduzierung**

Förderkennzeichen: 03SX292 A-D

Carsten Rickert (Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG)  
Moritz Frobenius (AVL Deutschland GmbH)  
Hartmut Schneider (L'Orange GmbH)  
Christian Fink (LKV Universität Rostock)  
Roland Pittermann (WTZ Roßlau gGmbH)

### **Einleitung**

Am 01. Januar 2016 tritt in den Emissionsschutzgebieten (ECA = Emission Control Area) die IMO III Abgasgesetzgebung der International Maritime Organisation (IMO) in Kraft. Diese gilt für alle Schiffsdieselmotoren mit einer Leistung >130 kW und regelt insbesondere den Stickoxidausstoß in Abhängigkeit der Motorenndrehzahl. Bezogen auf den heutigen Stickoxidgrenzwert beinhaltet die IMO III-Regelung eine Reduzierung um 75%. Außerhalb der ECAs bleibt dabei die seit 1. Januar 2011 gültige IMO II Norm aktiv.

Zielsetzung des Verbundvorhabens FAME war die Erarbeitung konkreter Lösungsansätze für die Einhaltung zukünftiger Abgasnormen durch innermotorische Maßnahmen. Im Rahmen des Projektes wurde deshalb in Zusammenarbeit der Projektpartner AVL Deutschland GmbH, Caterpillar Motoren GmbH, L'Orange GmbH, Universität Rostock und WTZ Roßlau gGmbH auf den Feldern Forschung, Entwicklung und Anwendung eine durchgängige Analyse verschiedener Technologien sowie der dazugehörigen physikalischen Mechanismen zur Erhöhung des Inertgasanteils im Brennraum durchgeführt. Dabei wurden sowohl bewährte Techniken aus dem Nkw- und Pkw-Sektor auf ihre Tauglichkeit für Schiffsdieselmotoren bei Einsatz aktueller und zukünftiger Marinekraftstoffe erprobt als auch neuartige Ansätze entwickelt und kombiniert an drei Versuchsmotoren eingesetzt. Zur Erreichung dieser komplexen Zielsetzung wurden Arbeiten in den folgenden Bereichen durchgeführt:

- Entwicklung einer 2-stufigen Aufladung und einer Abgasrückführung
- Anpassung und Untersuchung einer stofftrennenden Membrantechnologie zur Senkung des Sauerstoffanteils im Arbeitsgas
- Entwicklung eines druckgesteigerten Prototypeinspritzsystems



- Grundlegende Untersuchung der Auswirkung geometrischer Düsenparameter auf die Vorgänge bei Strahlzerfall, Gemischbildung, Verbrennung und Emissionsentstehung
- Entwicklung verbesserter Simulationsverfahren

Anschließend erfolgte die Zusammenführung der entwickelten Teillösungen in einem Versuchsmotor, dessen Abstimmung sowie die Bewertung in Bezug auf die Parameter NO<sub>x</sub>-Emission, Rußemission, Wirkungsgrad, thermische und mechanische Belastung.

## II. Motivation

Die International Maritime Organisation (IMO) hat für Schiffe mit einer Motorleistung >130 kW die Emissionsgrenzen für die Stickoxide (NO<sub>x</sub>) stufenweise gesenkt. Das Inkrafttreten der nächsten Stufe IMO Tier III [1], [2] am 01. Januar 2016 sieht eine Reduzierung der Stickoxidemissionen um 75% im Vergleich zur aktuell geltenden IMO Tier II Gesetzgebung vor, die außerhalb der Emissionsschutzgebiete weiterhin gültig bleibt. Der zulässige Schwefelanteil im Marinekraftstoff bzw. die äquivalenten Schwefelemissionen im Abgas werden zeitlich versetzt reduziert. Innerhalb der ECAs erfolgt dabei eine deutlich stärkere Begrenzung als außerhalb. Ab 2015 ist hier ein Grenzwert von 0,1 % angesetzt (Abb. 1).

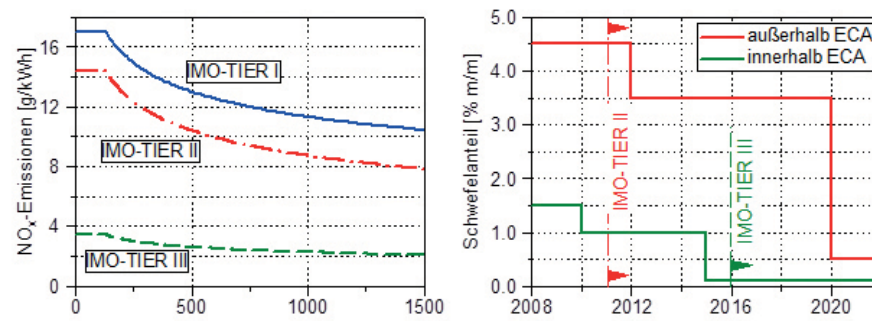


Abb. 1: IMO Grenzwerte für Stickoxide und Schwefelanteil im Kraftstoff bzw. im Abgas

Während die IMO II NO<sub>x</sub>-Grenzwerte gut durch innermotorische Maßnahmen erreicht werden konnten, kann eine weitere Reduktion nur durch katalytische Abgasnachbehandlung oder durch eine deutliche Senkung der Verbrennungsspitzen Temperaturen im Zylinder erreicht werden. Dazu muss der Inertgasanteil der Brennraumladung erhöht werden, was ohne weitere Maßnahmen zu steigenden Ruß- und Partikelemissionen führt. Hier kann

zum einen durch globale innermotorisch wirkende Maßnahmen zur Luftversorgung mittels erhöhter Aufladegrade als auch durch lokal in der Verbrennungszone wirkende Maßnahmen zur verbesserten Durchmischung von Luft und Kraftstoff mittels optimierter Einspritzparameter reagiert werden.

Allgemeines Ziel des Projektes war es, innermotorische Technologien und Wirkmechanismen für eine drastische Reduzierung der Stickoxidemissionen bei gleichzeitig minimalem Kraftstoffverbrauch sowie geringsten Rußemissionen zu erforschen und in Kombination an drei mittelschnelllaufenden Dieselmotoren einzusetzen.

## III. Versuchsträger

Für Versuche standen sowohl System- als auch Motorprüfstände zur Verfügung.

Am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock konnten an einem Einspritzverlaufsindikator zeitlich hoch aufgelöste Messungen der Einspritzrate durchgeführt werden (Abb. 2). Außerdem stehen zwei Hochdruck-Hochtemperaturkammern zur Untersuchung der Gemischbildung und Verbrennung mittels optischer und Lasermessverfahren zur Verfügung. Eine der beiden Kammern wurde eigens für das FAME Projekt neu konstruiert, um die Brennraumtemperaturen und Brennraumdrücke zum Zeitpunkt der Einspritzung bei einem realen Dieselmotor so nah wie möglich abbilden zu können (Abb. 3).

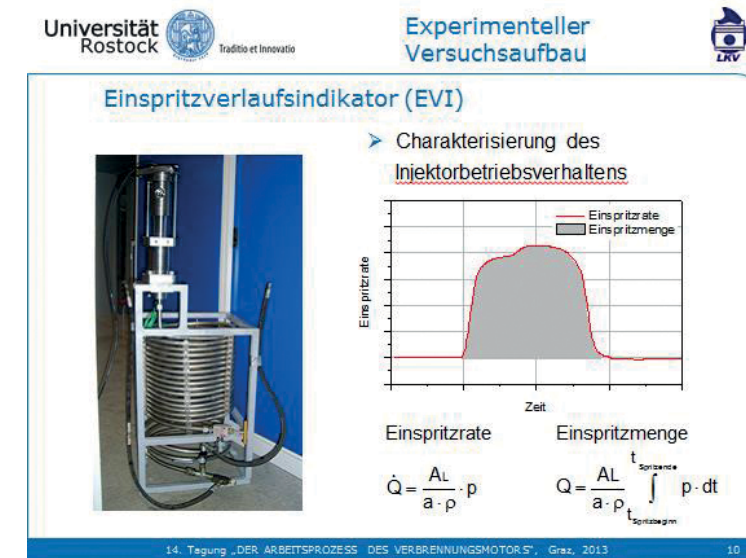
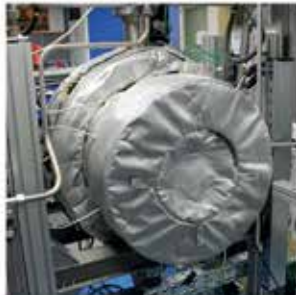


Abb. 2: Versuchsprüfstand Einspritzverlaufsindikator

### Optimierung neue Hochdruckkammer

- Verschiedene Optimierungsmaßnahmen an der Kammer
- Installation doppelt verglaster Fenster zur Reduzierung der Wärmeverluste
- Äußere Isolation der Kammer zur Verbesserung der Konditionierung des Kammerkörpers



26.03.2014

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren

22

Abb. 3: Versuchsprüfstand Hochdruck-Hochtemperatur Kammer

Für die Durchführung der Motorversuche stehen drei mittelschnell laufende Dieselmotoren zur Verfügung, die beiden 1-Zylinder Forschungsmotoren FM 16/1 und FM 24D der WTZ Roßlau gGmbH (Abb. 4) und ein MaK 6 M 32 Versuchsvollmotor der Caterpillar Motoren GmbH (Abb. 5). Der FM 24D ist mit einer Abgasrückführung ausgerüstet, der FM 16/1 mit einer stofftrennenden Membran. Mit beiden Methoden kann die Sauerstoffkonzentration der Zylinderladung gesenkt werden. Die 1-Zylindermotoren sind fremdaufgeladen und verfügen über ein Common-Rail-Einspritzsystem, mit dem sich der Einspritzdruck, der Einspritzzeitpunkt, die Anzahl der Einspritzungen pro Arbeitsspiel sowie deren zeitliche Abstände unabhängig vom Motorbetriebspunkt einstellen lassen. Der Vollmotor ist ebenfalls mit einem Common-Rail-Einspritzsystem ausgestattet. Er ist 2-stufig aufgeladen und besitzt eine Abgasrückführung sowie einen variablen Ventiltrieb. Insbesondere stand am FM 24D und am 6 M 32 neben dem Standard Common-Rail-Einspritzsystem jeweils ein neues Einspritzsystem mit einem gesteigerten maximalen Einspritzdruck von 2000 bar zur Verfügung, welches bei der L'Orange GmbH gefertigt wurde.

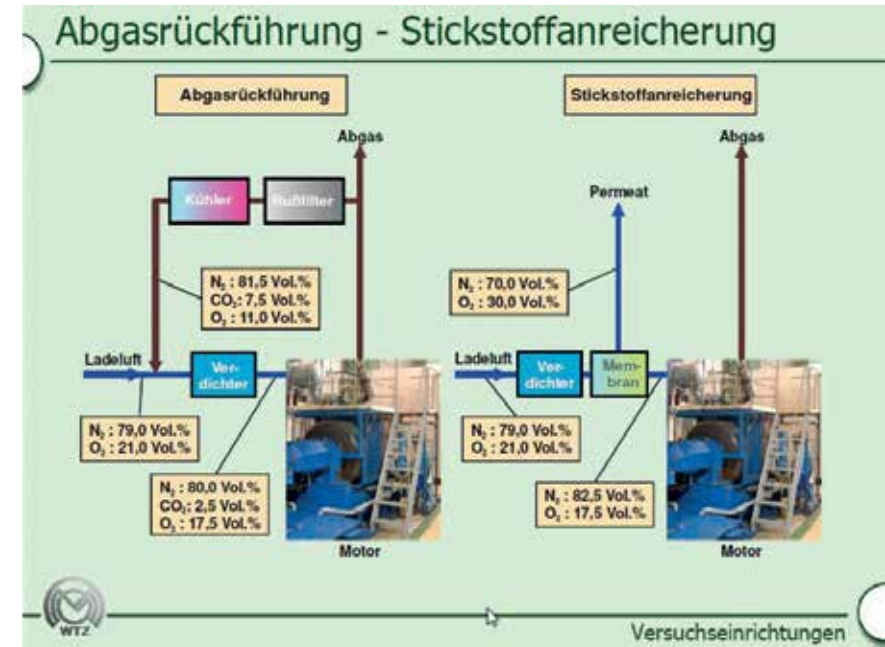


Abb. 4: 1 Zylindermotoren FM 24D mit Abgasrückführung und FM 16/1 mit Membran



Abb. 5: MaK 6 M 32 Versuchsmotor mit 2-stufiger Aufladung und Abgasrückführung



## IV. Durchgeführte Arbeiten im FAME Projekt

### IV.1. Weiterentwicklung der Einspritztechnik

#### IV.1.1. Steigerung des Einspritzdrucks

Bei der L'Orange GmbH wurde ein neues Common-Rail-Einspritzsystem entwickelt, mit dem sich ein maximaler Einspritzdruck von 2000 bar darstellen lässt. Dieser Schritt war Grundvoraussetzung, um die Rußemission bei gleichzeitiger Inertisierung der Zylinderladung unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze zu halten. Bisherige Systeme für Schiffdieselmotoren arbeiten mit Drücken bis ca. 1500 bar. Bei den heute verfügbaren Common-Rail-Systemen führen dynamische Effekte zu Druckspitzen im Rail, die mehrere Hundert Bar betragen können und somit den erzielbaren mittleren Druck aus Festigkeitsgründen limitieren. Um den Einspritzdruck weiter zu steigern, wurde der Kraftstoffspeicher vom Rail zum Injektor verlagert (Abb. 6). Zusätzlich wurde die Hochdruckpumpe zur Darstellung von max. 2000 bar Raildruck konstruktiv überarbeitet.

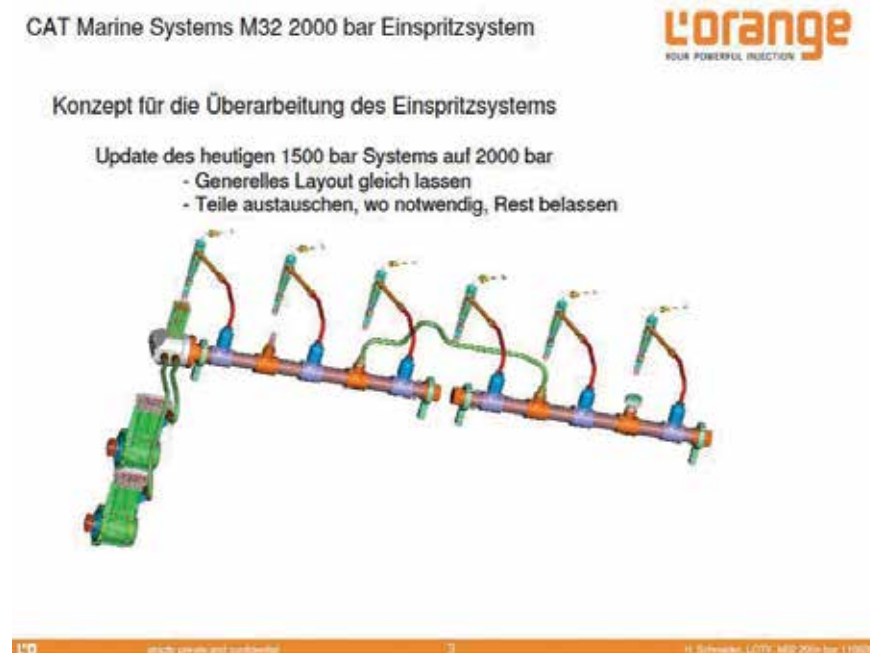


Abb. 6: Neues Common-Rail-Einspritzsystem mit injektornahem Speichervolumen

#### IV.1.2. Entwicklung neuer Einspritzdüsengeometrien

Ein weiterer Schwerpunkt bei den Entwicklungsaktivitäten der L'Orange GmbH war die Herstellung neuartiger Einspritzdüsengeometrien. Herkömmliche Einspritzdüsen weisen zentrisch gebohrte Spritzlöcher auf, deren Einlaufkanten durch hydroerosives (HE) Schleifen verrundet werden. Durch elektrokorrosive Bearbeitung als alternatives Fertigungsverfahren können bei der L'Orange GmbH auch konische Spritzlöcher (Abb. 7) hergestellt werden, die einem Ablösen der Strömung in den Spritzlöchern und damit Kavitation und einer negativen Auswirkung auf den Strahlerfall entgegenwirken. Die Auswirkung der neuen Spritzlochgeometrie auf die Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung wurden an den System- und Motorenprüfständen der Projektpartner detailliert untersucht.

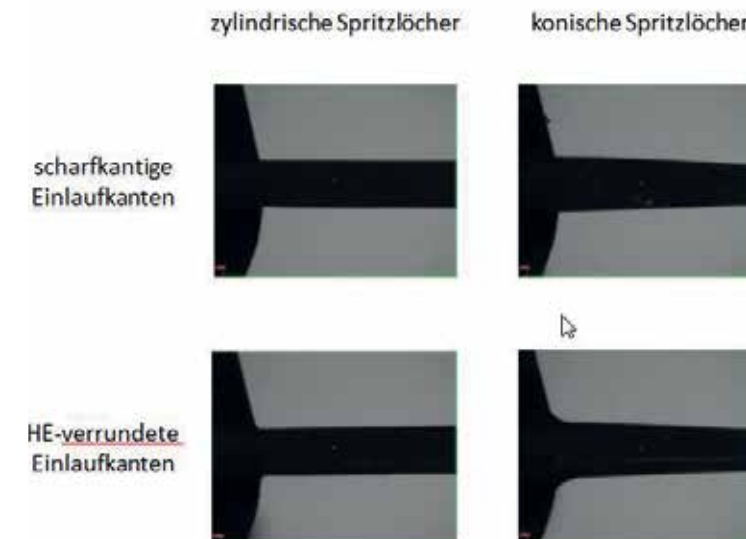
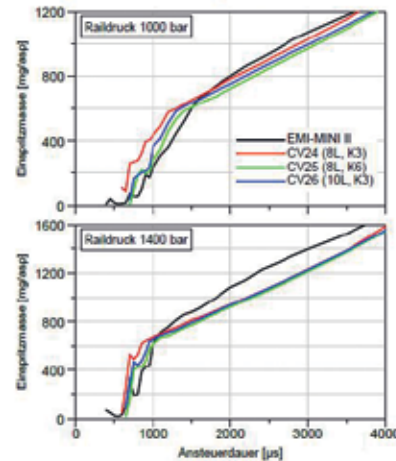


Abb. 7: Zylindrische und konische Spritzlöcher mit HE-verrundeten Einlaufkanten

### IV.2. Untersuchungen zur Gemischbildung

Am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock wurden die von der L'Orange GmbH gefertigten Düsen zunächst am

### Mengenkennfeld Injektoren CV24-CV26, EMI-MINI II

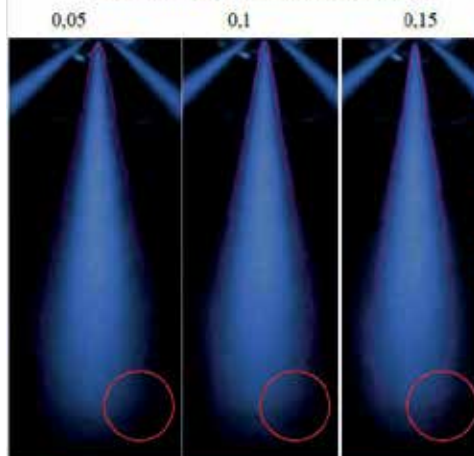


- Im ballistischen Bereich starke Abweichung der Einspritzmengen zwischen den Injektoren
- EMI-MINI II-Injektor besitzt im Nadelvollhubbereich höchste Einspritzmenge
- Bei hohem Raildruck starke Gradienten der Menge im ballistischen Bereich => schwierige Applikation NE

25.03.2013 UNIVERSITÄT ROSTOCK | Lehrstuhl für Kältemaschinen und Verbrennungsmotoren

Abb. 8: Kennlinien der Injektoren

### Auswertung - Sensibilitätsanalyse



- für den frei gewählten Grenzwert der Hell/Dunkel-Erkennung wurde eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt
- (hierbei entspricht 0 = Hell und 1 = Dunkel)
- die dargestellten Spraykeulen sind gemittelte Bilder aus mindestens 10 Einspritzungen
- mit der Sensibilität der Erkennung steigt auch die Messwertstreuung und Blitzlicht-Anomalien und mögliche Reflexionen laufen stärker in die Auswertung mit ein
- da der Grenzverlauf des Wertes 0,15 schon deutlich im Strahl liegt und somit nicht sensibel genug ist, wurde als Kompromiss der Wert 0,1 gewählt

23.10.2013 © 2009 UNIVERSITÄT ROSTOCK | FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU UND SCHIFFSTECHNIK

Abb. 9: Bestimmung des Strahlrandes durch Hell-Dunkel-Grenze

Einspritzverlaufsindikator vermessen. Dazu wurden die Kennlinien der Injektoren ermittelt (Abb. 8). Die Kennwerte wurden für 1D-Simulationen des hydraulischen Systems genutzt. Im Anschluss wurden die Strahleindringtiefen und die Strahlkegelwinkel in der HD-HT-Kammer gemessen (Abb. 9). Um das Verhalten des Einspritzstrahls bei verschiedenen Motorbetriebspunkten zu untersuchen, wurden die Gasdichte in der Kammer und der Einspritzdruck variiert. Es zeigt sich, dass der Raildruck und die Lochzahl den größten Einfluss auf die Strahleindringtiefe haben, während die Konizität nur einen geringen Einfluss hat.

### IV.3. Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen

Die AVL Deutschland GmbH führte eine Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen durch, so dass eine geschlossene Simulationskette von der Hydraulik des Einspritzsystems bis zur Schadstoffentstehung während der Verbrennung im Zylinder des Dieselmotors entstanden ist. Schwerpunkte waren die Entwicklung einer besseren Kopplung der 1D-Hydrauliksikulation und der 3D-Düseninnenströmungssimulation (Abb. 10), die Implementierung eines neuen Modells zum Strahlzerfall und die Erweiterung von Schadstoffberechnungsmodellen, insbesondere von Ruß.

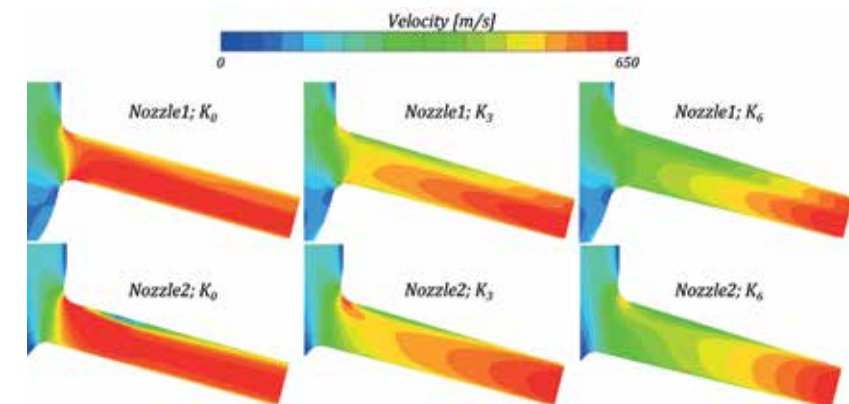


Abb. 10: 3D-CFD-Berechnung der Düseninnenströmung

Die verbesserten Modellansätze wurden schließlich am Beispiel der Verbrennungssimulation des 6 M 32 zusammengeführt (Abb. 11). Mit Hilfe der verbesserten Simulationswerkzeuge lassen sich jetzt detailliert die Vorgänge der Gemischbildung, Verbrennung und Schadstoffentstehung untersuchen. So können noch vor dem Bau von Prototypen aussichtsreiche Varianten von Einspritzdüsen- und Brennraumgeometrieausgewählt werden.

OP = 100%, EGR=21% - upper injector row  
Equivalence-Ratio

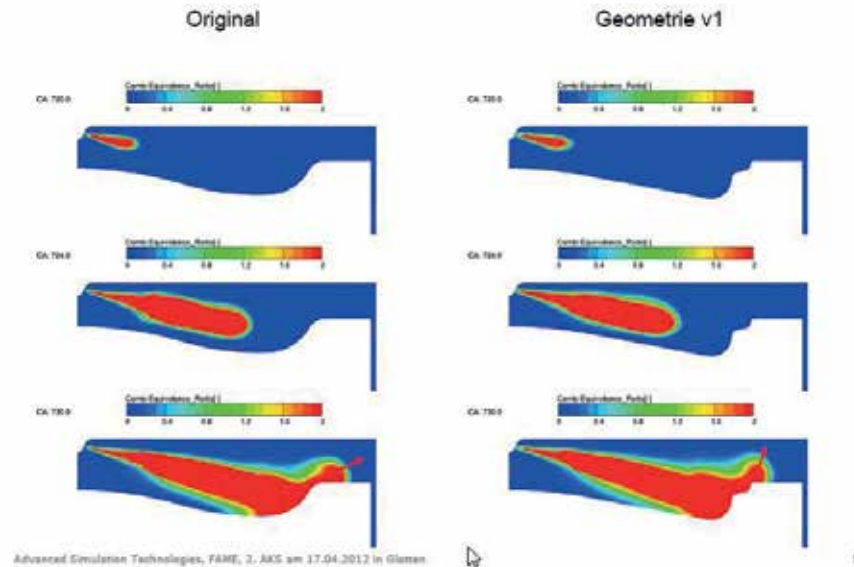


Abb. 11: 3D-CFD-Verbrennungsrechnung

#### IV.4. Untersuchungen an 1-Zylindermotoren

##### IV.4.1. Grundlagenuntersuchungen mit Abgasrückführung

Bei der Abgasrückführung wird ein Teilstrom des Abgases der vom Zylinder angesaugten Frischluft zugemischt. Dadurch verringert sich der Sauerstoffanteil der Zylinderladung und der Inertgasanteil wird erhöht.

Exemplarisch zeigt das Abbildung 12 das Vorgehen bei der Versuchsdurchführung am Beispiel des 25% Lastpunktes im Generatorbetrieb. Mit steigender AGR-Rate sinkt die NO<sub>x</sub>-Emission, wobei der Kraftstoffverbrauch leicht und die Rußemission deutlich ansteigen. Um die Rußemission wieder unter die Sichtbarkeitsgrenze zu drücken, ohne den NO<sub>x</sub>-Grenzwert zu überschreiten, erweisen sich eine Erhöhung des Einspritzdrucks auf 2000 bar und eine Spätverstellung der Einspritzung als erfolgreich.

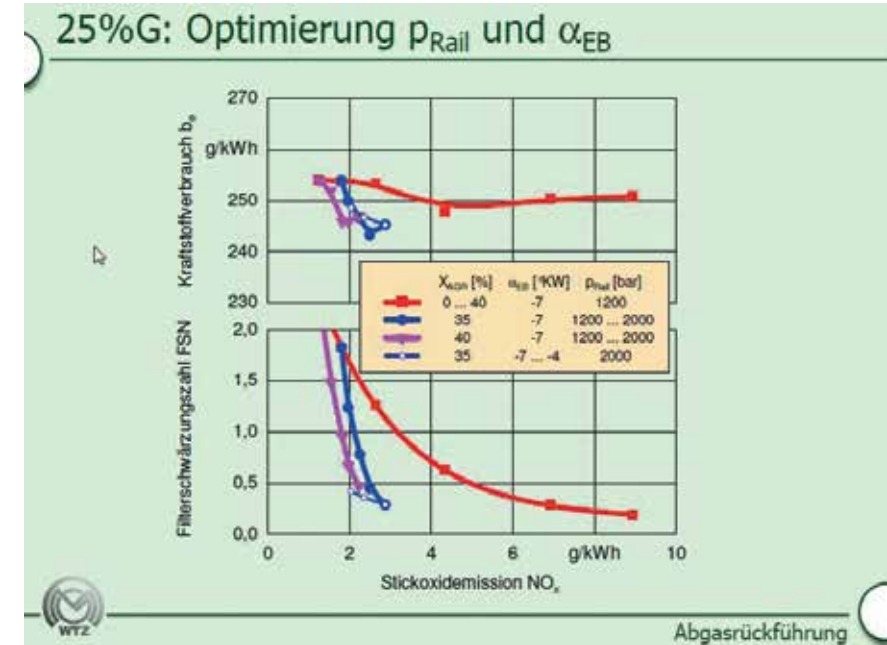


Abb. 12: Wirkung von AGR-Rate, Einspritzdruck und Einspritzbeginn im G25 Lastpunkt

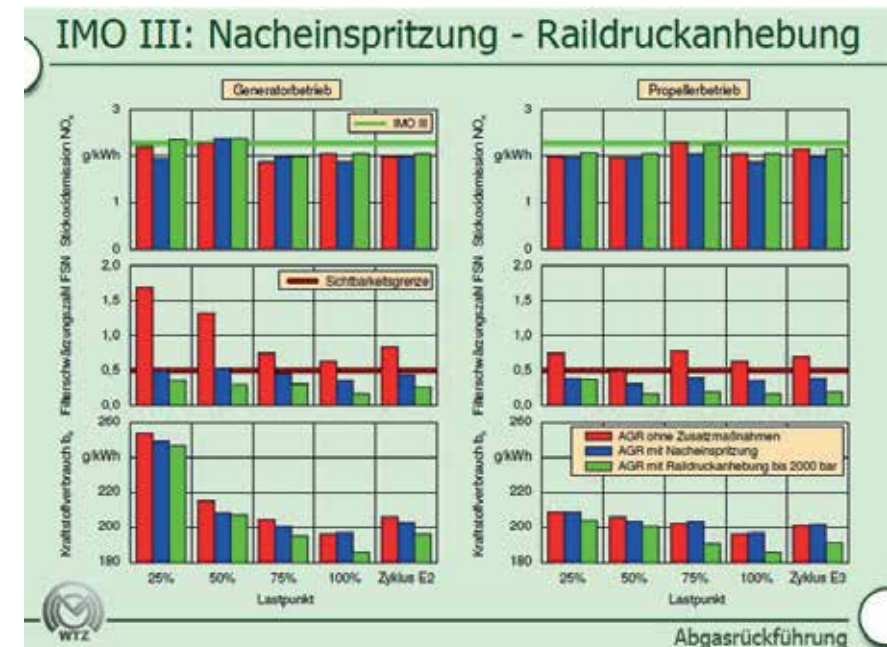


Abb. 13: Zielerreichung durch AGR und Hochdruckeinspritzung



Ähnlich der gezeigten Variation wurden für die übrigen relevanten Lastpunkte des Emissionszyklus die Emissionswerte und Kraftstoffverbräuche gemessen, wobei neben der Anhebung des Einspritzdrucks auch eine Nacheinspritzung sowie unterschiedliche Düsengeometrien untersucht wurden. Es zeigt sich, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionsgrenze IMO Tier III zwar allein durch Abgasrückführung erreicht wird, aber dass für die Darstellung einer unsichtbaren Rußemission bei gleichzeitig minimalem Kraftstoffverbrauch eine Anhebung des Einspritzdrucks auf 2000 bar notwendig ist (Abb. 13). Neue Düsengeometrien, wie z.B. konische Spritzlöcher, wirken sich in einigen Lastpunkten positiv auf die Rußemission aus.

Die am FM 24D erprobte Strategie bildete das Konzept für den Vollmotor 6 M 32.

#### IV.4.2. Grundlagenuntersuchungen mit Membranen

Bei der Membrantechnologie wird die Frischluft vor dem Motor über eine stofftrennende Membran geleitet, die den Luftstickstoff und den Luftsauerstoff zu einem bestimmten Grad trennt, sodass der sauerstoffarme (und stickstoffangereicherte) Teilstrom dem Motor zugeführt wird.

Es wurden Membranmodule aus unterschiedlichen Polymeren untersucht, wie sie heute bereits in industriellen Prozessen angewendet werden. Deren Kennwerte wurden zunächst im für einen Dieselmotor relevanten Ladedruckbereich bis 5,5 bar und Stickstoffkonzentrationen von 79 bis 83 Vol. % vermessen (Abb. 14). Analog zur Vorgehensweise mit Abgasrückführung am FM 24D wurden am FM 16/1 die Einspritzparameter bei verschiedenen Betriebsdrücken der Membran variiert. In der Summe ergibt sich mit der Membrantechnik annähernd dasselbe Bild bzgl. der Schadstoffemissionen wie bei der Abgasrückführung. Eine Kombination aus hohem Einspritzdruck und Nacheinspritzung ermöglicht die Darstellung der IMO Tier III Stickoxidemissionsgrenze bei gleichzeitig unsichtbarem Ruß und minimalem Kraftstoffverbrauch (Abb. 15).

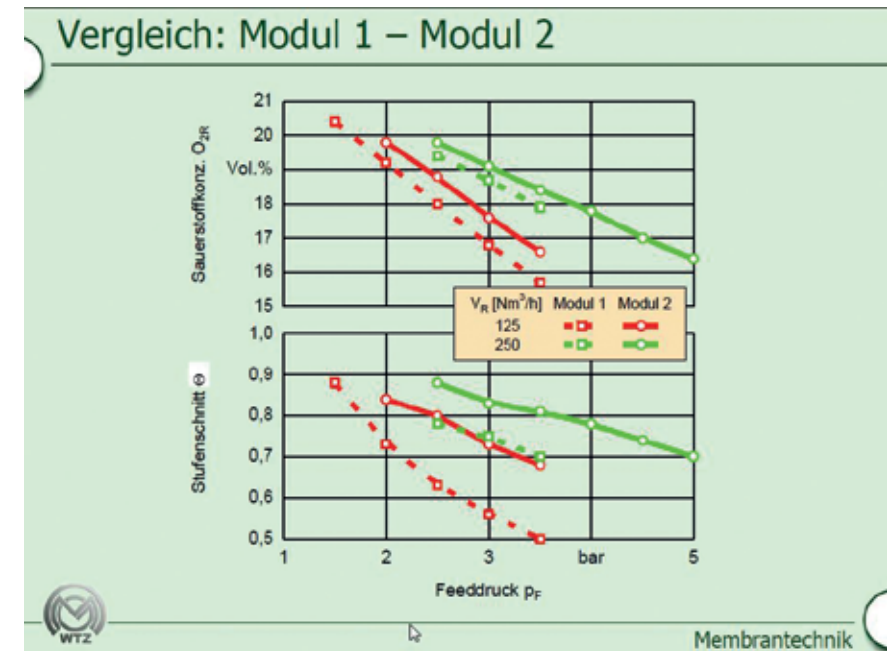


Abb. 14: Vergleich der Kennwerte von Membranen

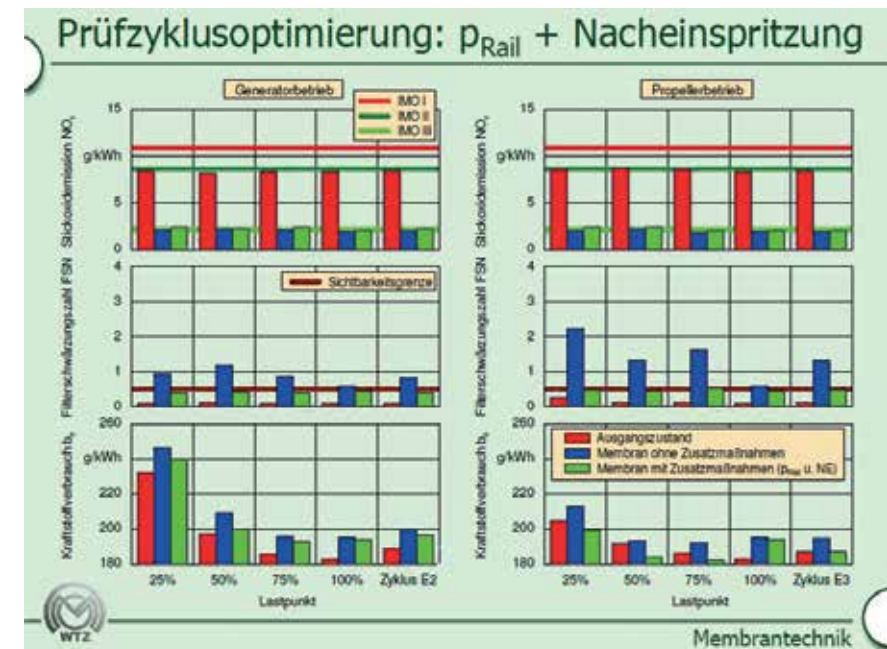


Abb. 15: Zielerreichung durch Ladeluftinertisierung und Hochdruckeinspritzung

#### IV.5. Untersuchungen am Vollmotor

Der 6 M 32 Motor der Caterpillar Motoren GmbH wurde auf ein 2-stufiges Aufladesystem mit schaltbarer Hochdruck-AGR umgebaut (Abb. 16). Das Konzept sieht vor, dass der Motor innerhalb der ECAs mit dem ab 2015 dort vorgeschriebenen Kraftstoff mit niedrigem Schwefelanteil mit Abgasrückführung betrieben wird und die IMO III Emissionsgrenzen erfüllt. Außerhalb der ECAs wird die Abgasrückführung abgeschaltet, und der Motor kann mit kostengünstigem Schweröl betrieben werden. In diesem Betriebsmodus erfüllt der Motor die IMO II Emissionsgrenze.

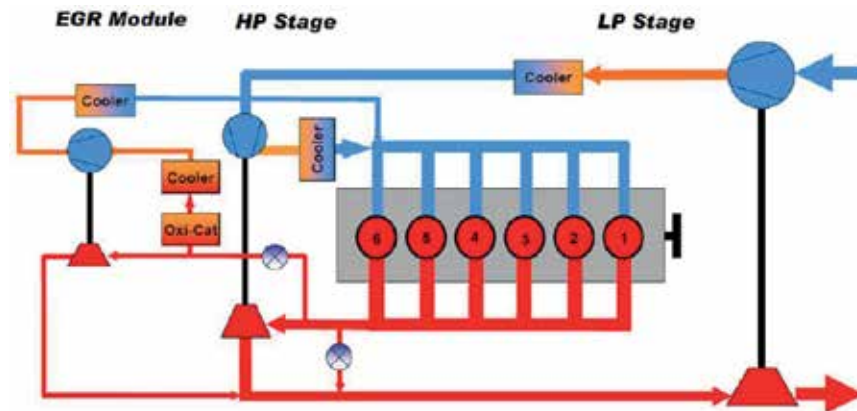
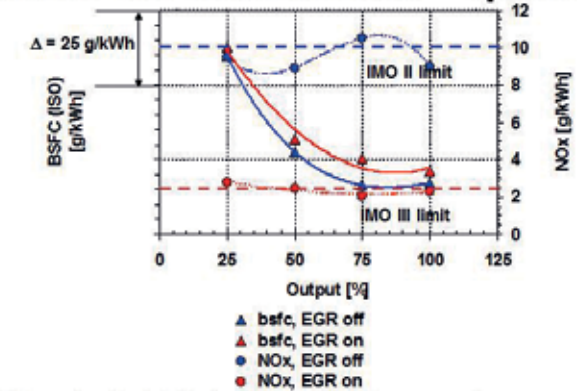


Abb. 16: Aufladeschema 6 M 32 mit 2-stufiger Aufladung und Hochdruckabgasrückführung

Der Abstimmung des Aufladesystems kam eine hohe Bedeutung zu. Durch Kreisprozessrechnungen wurde das System vorabgestimmt. Mit dem gewählten Konzept wurde ein Kompromiss aus ausreichendem Abstand zu den Betriebsgrenzen der Turbolader und hohem Wirkungsgrad gefunden.

Mit dem vorhandenen Einspritzsystem und Aufladekonzept des 6 M 32 kann mit optimiertem Luftmanagement die jeweils gültige Stickoxidemissionsgrenze innerhalb und außerhalb der ECAs eingehalten werden (Abb. 17). Es sind aber noch weitere Schritte nötig, um das Ziel „IMO III“ bei gleichzeitig unsichtbarer Rußemission und minimalem Kraftstoffverbrauch darzustellen.

#### Verbrauch und NOx-Emission – Optimiert



Mit optimaler Turbolader- und Ventilsteuerzeitenanpassung:

EGR aus: IMO II NOx-Level wird erfüllt

EGR ein: IMO III NOx-Level wird erfüllt



Abb. 17: NOx-Emissionsgrenzen werden am 6 M 32 erfüllt

Mit der Inbetriebnahme des Hochdruck-Common-Rail-Einspritzsystems wurden die Voraussetzungen geschaffen, die an den 1-Zylindermotoren erprobten Konzepte zur Reduzierung des Rußes bei minimalem Kraftstoffverbrauch auf den Vollmotor zu übertragen. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung stehen abschließenden Versuche noch aus.

#### VIII. Literatur

- [1] International Maritime Organisation, MP/CONF. 3/35, Annex "Technical code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines", 10/1997
- [2] International Maritime Organisation, MEPC 58/23/Add.1, ANNEX 13, "Amendments to the annex of the protocol of 1997 ...", 10/2008



## **BossCEff – Steigerung des Propulsionswirkungsgrades durch Reduktion von Nabenwirbelverlusten**

Förderkennzeichen: 03SX296

Lars Greitsch, Robert Pfannenschmidt (Mecklenburger Metallguss GmbH)  
Moustafa Abdel-Maksoud, Markus Druckbrod  
(Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Hans-Jürgen Heinke (Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam)

### **Einleitung**

Bedingt durch die Steigerung des Kostendrucks in der Schifffahrt, resultierend aus gestiegenen Kraftstoffpreisen, gesunkenen Transportvolumina und strukturellen Überkapazitäten, liegt der Fokus auf Maßnahmen, die zu zusätzlichen Kraftstoffeinsparungen führen. Zur Stärkung der Position im Bereich Entwurf und Evaluation ergab sich damit für die Verbundpartner die Notwendigkeit einer systematischen Untersuchung dieser propulsionsverbessernden Maßnahmen.

Der Stand der Technik bietet seit jeher viele verschiedene, teilweise untereinander konkurrierende Maßnahmen und Technologien, um den Gesamtwirkungsgrad von Schiffen zu steigern. Die Maßnahmen greifen dabei auf verschiedene physikalische Grundeffekte der Schiffspropulsion zurück. Daher stand zu Beginn der Planung des Vorhabens eine Vorauswahl der Maßnahmen an.

Ziel war es, Maßnahmen zu identifizieren, die ein günstiges Verhältnis zwischen Aufwand und Leistungseinsparung zeigen. Auf Basis vorhandener Marktstudien wurden als Arbeitsgrundlage für das Forschungsvorhaben BossCEff optimierte Ruderanlagen mit Propulsionsbirnen sowie Flossenkappen festgelegt. Beide Maßnahmen weisen geringe Kosten in der Anwendung auf. Darüber hinaus waren für beide propulsionsverbessernde Maßnahmen Verbesserungspotentiale durch detaillierte numerische Berechnungen und generische Optimierungen zu erwarten.

### **2. Vorgehensweise**

Das Vorhaben gliederte sich in numerische und experimentelle Voruntersuchungen, in die Entwicklung von Entwurfs- und Optimierungsverfahren sowie die Validierung der Berechnungen mit Hilfe von schiffbaulichen Modellversuchen. Die Antragsteller teilten sich die Gesamtaufgabe gemäß folgender Schwerpunktsetzung:

1. BossOpt – Entwicklung einer Entwurfsmethode (TUHH)
2. BossCalc – Entwicklung von Berechnungsverfahren (MMG)
3. BossTest – Entwicklung von Testverfahren (SVA)

### 3. Voruntersuchungen

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde eine Bestandaufnahme vorgenommen, um sowohl die messtechnischen Möglichkeiten als auch den Stand der Entwurfs- und Berechnungskapazitäten mit der gestellten Aufgabe zu vergleichen.

Um eine breite Validierungsbasis für die zu entwickelnden Entwurfsverfahren zu erlangen, wurden Propellerfreifahrt-, Propulsions- und Kavitationsversuche mit verschiedenen, im Vorhaben entworfenen Geometrievarianten von propulsionsverbessernden Maßnahmen im nabennahen Bereich durchgeführt (siehe Abb. 1). Darüber hinaus wurden dreidimensionale Verteilungen des Strömungsfeldes im interessierenden Bereich betrachtet.



Abb 1: Testprogramm der verschiedenen Kombinationen aus Ablaufhaube und Rudergeometrie innerhalb der Voruntersuchungen

### 4. Entwicklung der Berechnungsmethoden

Als verwendete Berechnungsverfahren müssen vor allem das nicht-kommerzielle Paneelverfahren *panMARE* sowie der kommerzielle RANS-Löser Ansys CFX genannt werden. Daneben standen bei den Berechnungen auch MMG-interne Berechnungsverfahren zur Verfügung. Die Erweiterungen der Berechnungsverfahren konzentrierten sich auf

- Erweiterung des Berechnungsverfahrens zur besseren Berücksichtigung der Propellernabe
- Entwicklung eines geeigneten Kopplungsverfahrens zwischen Paneelverfahren und RANS-Code

Neben der Berücksichtigung der Nabenflächen in der potentialtheoretischen Berechnungsmethode zur Verbesserung der Erfassung der nabennahen Geschwindigkeiten stand die numerische Kopplung eines potentialtheoretischen Verfahrens zur Berücksichtigung der Propellerströmung mit einem viskosen Strömungslöser (RANSE-Löser) im Fokus.

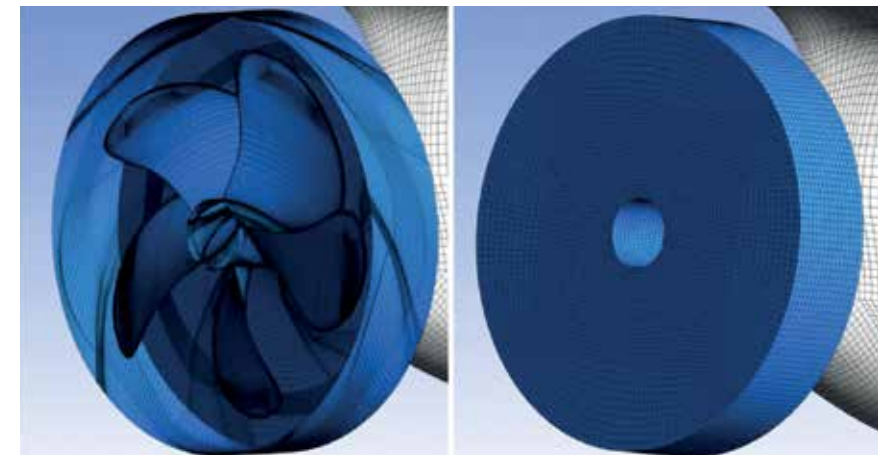


Abb. 2: Propellerdiskretisierung des Kopplungsmodells

Das Kopplungsmodell wurde dabei unter Berücksichtigung der axialen Ausdehnung der Propellergeometrie in Schiffslängsrichtung aufgesetzt, um alle Geschwindigkeitskomponenten der Propellerumströmung hinreichend genau aus der Propellerberechnung in die Gesamtströmung zu übertragen (Abb. 2). Die notwendige Rückkopplung der effektiven Strömung erfolgte anhand von Kontrollpunkten in einem idealen Abstand vor der Propellerebene. Zur Erfassung der instationären Effekte wurde die Berechnung dabei unter zeitlicher Auflösung durchgeführt.

Zur Validierung der Methode wurden verschiedene Plausibilitätsüberprüfungen durchgeführt. Dabei wurden die reine Propellerumströmung sowie die Interaktion mit dem Schiffsrumpf zwischen der gekoppelten Rechnung und voll diskretisierten Berechnungen verglichen und ergaben gute Übereinstimmung.

Nachfolgend wurden mit Hilfe der Kopplungsmethode Berechnungen der nabennahen Strömung durchgeführt. Zur Unterstützung der Berechnungen konnte auf intensive Gitterstudien zur Identifizierung der notwendigen Diskretisierungstiefe des Totwassergebiets hinter der Propellernabe aus den Voruntersuchungen zugegriffen werden.

## 5. Entwicklung der Entwurfsmethoden

Zur Entwicklung der Entwurfsmethoden unter Anwendung von Optimierungsalgorithmen wurden Konzepte für die Parametrisierung der zu entwerfenden Geometrie. Neben bekannten Parametrisierungsansätzen für Propulsionsbirnen mussten neue Ansätze für sogenannte Übergangshauben und die Flossenkapen gefunden werden, um den Optimierungsalgorithmen die notwendige Variationsmöglichkeit zu geben.

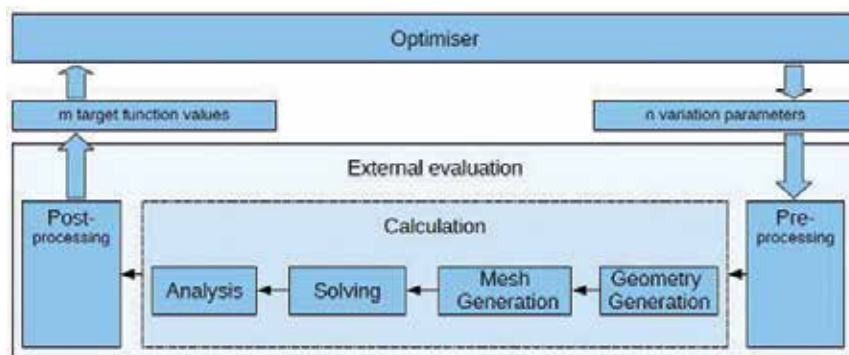


Abb. 3: Aufbau des Optimierungszyklus

Der Optimierungszyklus (siehe Abbildung 3) beinhaltet neben der erwähnten Geometrieerzeugung die Generierung der Rechengitter, die Berechnung sowie die Auswertung der Ergebnisse auf Basis einer formulierten Zielfunktion. Die Berechnung erfolgte dabei unter Nutzung der gekoppelten Berechnungsverfahren für Propeller und globale Strömung.

## 6. Entwicklung der Testmethoden

Für den Vergleich der einzelnen Varianten und zur Schaffung einer Validierungsgrundlage erfolgten umfangreiche Modellversuche. Neben dem bekannten Containerschiff KCS wurden die Versuche mit Geometrien von Schüttgut- und Mehrzweckfrachtern durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Propulsionsbirnen in Kombination mit Übergangshauben sowie unterschiedliche Flossenhauben untersucht.

Bei der Weiterentwicklung der Testmethoden stand die Entkopplung der Kraftmessung von Propeller und Ablaufhaube im Vordergrund. Mit Hilfe eines Doppeldynamometers mit zwei Propellerwellen ähnlich dem Aufbau von Versuchen mit Gegenlaufpropellern konnten Kräfte und Momente an Propeller und Kappe getrennt gemessen werden. Damit ergab sich die Möglichkeit der getrennten Analyse der Einflüsse des einzelnen Entwurfs.

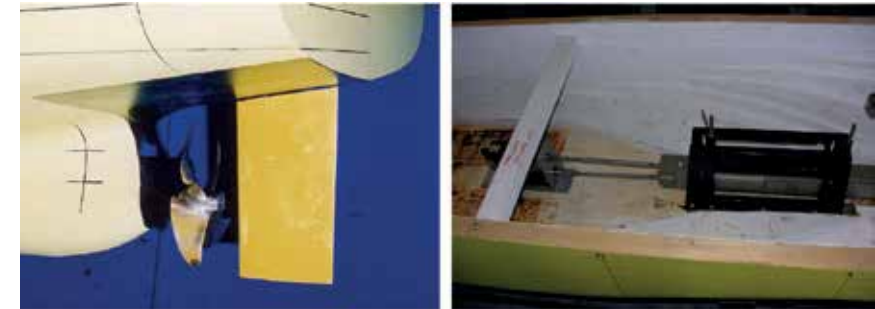


Abb. 4: Testaufbau mit Doppeldynamometer

Neben dem Einfluss der Entwurfsvariante auf die Ergebnisse stand die Frage nach Unterschieden in Abhängigkeit von der Testmethode. So wurde beispielsweise die Abstromrichtung bei Propellerfreifahrtversuchen untersucht. Es zeigte sich eine sehr starke Abhängigkeit der Propellerkennwerte von der Abstromrichtung. Damit ergibt sich die Notwendigkeit der Berücksichtigung dieser Effekte bei der Aufstellung von Leistungsprognosen für den schiffbaulichen Gesamtentwurf.

## 7. Zusammenfassung

Die Propulsionsverbesserung ist in den letzten Jahren wieder stark in den Fokus gerückt. Brennstoffkosten auf dauerhaft hohem Niveau sowie der gestiegene Konkurrenzkampf der Reedereien lassen das Interesse hier stark wachsen. Moderne CFD-Verfahren bieten die Möglichkeit bereits bekannte Lösungen weiter zu entwickeln und die erreichbaren Einsparungen zu steigern.

BossCEff bot den Antragstellern einen tiefen Einblick in das Thema Propulsionsverbesserung durch Minimierung der Nabenwirbelverluste. Insbesondere die intensiven Voruntersuchungen boten bald nach Projektstart erste Validierungsfälle. Die für die Voruntersuchungen notwendigen systematischen Vorwürfe führten zu einem raschen Kenntniserwerb zum Thema Nabenwirbelverluste und propulsionsverbessernde Maßnahmen. Die parallel laufenden grundlegenden Untersuchungen der nabennahen Strömung mit Hilfe von modernen CFD-Verfahren boten eine gute Unterstützung dieser Arbeiten.

Durch den hohen experimentellen Anteil des Vorhabens konnten die Entwurfsarbeiten parallel begleitet werden. Somit waren schnelle Reaktionszeiten möglich. Insbesondere die komplexe nabennahe Strömung verlangt nach einer sorgfältigen Auswahl der verwendeten Methoden.

Die Antragsteller haben sich während der Laufzeit auf zwei Ausführungsvarianten der Propulsionsverbesserung konzentriert. In die nähere Betrachtung kamen die Weiterentwicklung der Propulsionsbirne mit angepasster Ablaufhaube sowie die CFD-basierte Neuentwicklung der Flossenhaube als günstige Nachrüstvariante.

## 8. Literatur

- [1] BERGER, S. ; BAUER, M. ; DRUCKENBROD, M. ; ABDEL-MAKSOUUD, M.: An efficient viscous/ inviscid coupling method for the prognosis of propeller-induced hull pressure fluctuations. In: 7th International Conference on Ships and Shipping Research (2012)
- [2] BERGER, S. ; DRUCKENBROD, M. ; GREVE, M. ; ABDEL-MAKSOUUD, M. ; GREITSCH, L.: An Efficient Method for the Investigation of Propeller Hull Interaction. In: 14th Numerical Towing Tank Symposium (2011)
- [3] DRUCKENBROD, M. ; GREITSCH, L. ; BEDNAREK, S. ; BERGER, S. ; ABDEL-MAKSOUUD, M.: Geometric modelling for optimisation of propeller hub caps. In: 15th Numerical Towing Tank Symposium (2012)
- [4] GREITSCH, L. ; DRUCKENBROD, M. ; BEDNAREK, S. ; HEINKE, H.-J.: A holistic design approach for propulsion packages. In: 3rd International Symposium on Marine Propulsors (2013)
- [5] PFANNENSCHMIDT, R. ; GREITSCH, L. ; GREVE, M.: Numerical modelling and error estimation of the flow behind marine propellers. In: 15th Numerical Towing Tank Symposium (2012)

## **LESSEO – Untersuchung der Lecksicherheit von Schiffen unter besonderer Berücksichtigung des zeitabhängigen Sinkverhaltens und dynamischer Einflüsse aus großen freien Oberflächen**

Förderkennzeichen: 03SX310

Florian Kluwe (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG)  
Oliver Lorkowski (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG)  
Stefan Krüger (Technische Universität Hamburg-Harburg)  
Hendrik Dankowski (Technische Universität Hamburg-Harburg)

### **Einleitung**

Die Einführung der harmonisierten, probabilistischen Leckrechnung in 2009 [SOLAS II-1, Part B-1] haben zu einer neuen Bewertung des Sicherheitsniveaus von beschädigten Fahrgastschiffen geführt. In diesem Zusammenhang gewinnt die zeitabhängige Betrachtung der Leckstabilität zunehmend an Bedeutung.

In der harmonisierten Leckrechnung wird die Bewertung von Zwischenflutungszuständen gefordert. Die derzeitige Praxis überlässt es dem Berechnungsingenieur, bzw. dem prüfenden Mitarbeiter der Flaggenstaatsbehörde oder Klasse, festzulegen welche Zwischenflutungszustände deterministisch betrachtet werden. Damit besteht die Gefahr, dass kritische Zwischenflutungszustände übersehen werden. Eine zeitabhängige Berechnung der Leckstabilität unter fortschreitender Flutung bietet hier eine Alternative, um den tatsächlichen Flutungsvorgang zuverlässig zu betrachten.

Auch im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der „Safe Return to Port“-Regeln, welche die Funktionsfähigkeit von Fahrgastschiffen für bestimmte Schadensszenarien adressieren, wird für die Zukunft erwartet, dass die Anforderungen an den Nachweis einer sicheren Evakuierung des Schiffes verschärft werden. Die Bewertung der Evakuierungszeit in einem solchen Fall erfordert ebenfalls eine zeitabhängige Betrachtung der Leckstabilität, um zuverlässige Aussagen zur zeitabhängigen Schwimmelage in verschiedenen Schadensszenarien machen zu können.

Des Weiteren hat bereits die erste im Auftrag der EMSA (European Maritime Safety Agency) durchgeführte Studie zur Sicherheit von RoRo-Passagierschiffen [1] gezeigt, dass das Sicherheitsniveau von Fahrgastschiffen nach der



harmonisierten Leckrechnung (SOLAS 2009) fallweise deutlich geringer ist als nach der alten deterministischen Passagierschiffsleckrechnung nach SOLAS 90 in Kombination mit dem in Europa verbindlichen Stockholmarabkommen (EC-Directive 2003/25/EC), da nach der SOLAS 2009 kein Wasser auf Fahrzeugdecks berücksichtigt werden muss. Im Zuge des Vorhabens wurde daher auch die Frage erörtert, ob auf Basis der bestehenden Vorschriften ein Kriterium ermittelt werden kann, das den Wasser-an-Deck Fall berücksichtigt und zu einem äquivalenten Sicherheitsniveau führt.

Im Verbundvorhaben LESSEO ist eine quasistatische Berechnungsmethode entwickelt worden, die eine zeitabhängige Bewertung der Leckstabilität von Schiffen einschließlich Zwischenflutungszuständen [10] ermöglicht. Die Methode wurde mit einer Modellversuchskampagne validiert, bei der Leckfälle eines Schwimmkörpers im Glattwasser (statisch) und unter Einfluss einer erzwungenen Bewegung (dynamisch) untersucht wurden. Im Vordergrund der Modellversuchskampagne standen vor allem Leckfälle mit einer signifikanten Flutungsbehinderung, welche zu kritischen Zwischenflutungszuständen führen kann. Dies dient auch als Qualitätskriterium für die quasistatische Vorgehensweise, da sich bei Flutungsbehinderung verstärkt dynamische Strömungseinflüsse bemerkbar machen.

Des Weiteren wurden mit der Methode Unfalluntersuchungen [7, 8, 11, 12, 13] durchgeführt um den Unfallhergang einzelner Schiffe rekonstruieren zu können.

Weiterhin wurden die entwickelten Methoden angewendet um einen Vorschlag zur Bewertung von großen Wassermengen auf Fahrzeugdecks auszuarbeiten, der in die bestehenden Vorschriften integriert werden könnte.

Der folgende Bericht gibt eine Übersicht zu den entwickelten Methoden und der angewendeten Modellversuchskampagne einschließlich einer Diskussion der erzielten Ergebnisse.

## Numerische Methoden

Die quasistatische Flutungsmethode nach Dankowski [4] basiert auf einer Berechnung der Flüsse durch Öffnungen (z. B. Türen, Lecks) über ein hydraulisches Modell. Aufgrund der veränderten Massenverteilung durch das zusätzliche Wasser und dessen Ausbreitung im Schiff stellt sich eine neue Schwimmelage ein, die iterativ durch eine hydrostatische Berechnungsmethode ermittelt wird. Die quasistatische Methode wurde im Rahmen des Vorhabens beispielweise zur Unfalluntersuchung der Costa Concordia erfolgreich angewendet um den Unfallhergang rekonstruieren zu können [8].

Bei der Flutung von großen freien Flächen wie beispielsweise Fahrzeugdecks auf Fähren ist die Dynamik der Wasserbewegung genauer zu berücksichtigen. Diese Berechnung erfolgt mit Hilfe der numerischen Lösung der Flachwassergleichungen unter dem Einfluss der auf die Wassermassen wirkenden Beschleunigungen durch die Schiffsbewegung. Als numerisches Verfahren wird die Methode nach Glimm und Petey [5,6] verwendet. Diese wurde im Rahmen des Vorhabens stabilisiert und erweitert, so dass auch komplexere Geometrien modellierbar sind. Somit ist es jetzt insbesondere möglich, die Geometrie von Fahrzeugdecks besser abzubilden und Leckfälle mit Wasser auf dem Fahrzeugdeck im Seegang zu rechnen. Abbildung 1 zeigt am Beispiel der „Estonia“ einen Vergleich der bestehenden (links) und der im Rahmen des Vorhabens erweiterten Diskretisierung des Fahrzeugdecks.

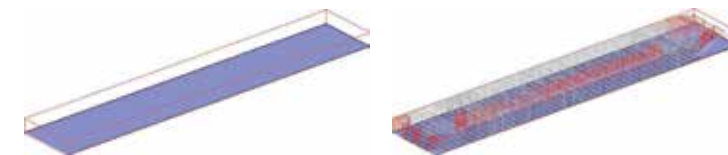


Abb. 1: Diskretisierung der Wasseroberfläche durch eine rechteckige Grundfläche (links) und mit neuem, flexibleren Gitter (rechts).

Als alternatives Verfahren zur Lösung der Flachwassergleichungen nach Saint-Venant wurde das Verfahren nach Kurganov [6] implementiert. Dieses Verfahren zeichnet sich durch seine Stabilität und Rechengeschwindigkeit aus, sodass erwartet wird die ursprüngliche Methode nach Glimm weiter stabilisieren und deren Laufzeit verkürzen zu können. Abbildung 2 zeigt die Anwendung des implementierten Lösert nach Kurganov auf ein klassisches „Dammbruch-Problem“.

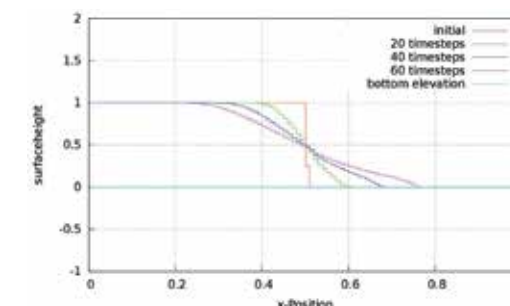


Abb. 2: Zeitschritte zur Simulation des Dammbruch-Problems.

Das implementierte Verfahren wird derzeit noch mit weiteren Testfällen verifiziert. Anschließend soll das Verfahren an die bestehende Methode zur Berechnung von Schiffsbewegungen im natürlichen Seegang unter

Berücksichtigung der dynamischen Bewegung von Leckwasser auf Decks angebunden werden.

## Schwimmkörper

Zur Validierung der entwickelten Methoden wurde ein Schwimmkörper konstruiert. Die Unterteilung des Schwimmkörpers wurde so gewählt, dass symmetrische und unsymmetrische Leckfälle sowie Leckfälle mit Flutungsbehinderung untersucht werden können. Des Weiteren wurde ein Hauptdeck mit großer Decksfläche vorgesehen um den Effekt großer freier Flüssigkeitsoberflächen untersuchen zu können. Abbildung 3 zeigt links eine Foto des Modells und rechts eine schematische Darstellung der Unterteilung.

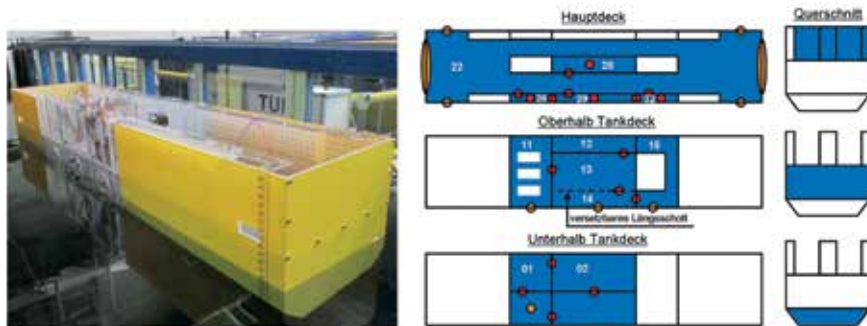


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau des Schwimmkörpers.

Der Schwimmkörper ist 2 m lang, 0.42 m breit, 0.44 m hoch und wurde vollständig aus Acrylglas gefertigt. Die flutbaren Abteilungen sind in Abbildung 3 (rechts) blau dargestellt. Die Unterteilung ist an moderne RoPax-Entwürfe angelehnt. Abteilung 22 repräsentiert beispielsweise ein typisches Fahrzeugdeck, wobei sowohl die Variante mit seitlich angeordneten Treppenhäusern und Schächten („Side-casing“) als auch die mit zentral angeordneter vertikaler Infrastruktur („Centre-casing“) simuliert werden können. Abteilung 11 steht für einen Hilfsmaschinenraum und Abteilung 15 ist ein typischer Leerraum um eine Bunkertankabteilung. Abteilung 14 wurde mit einem Längsschott ausgestattet, das an die Positionen 0.5B, 0.35B und 0.25B versetzt werden kann. In der Position 0.25B können die Abteilungen 2, 12 und 14 zu einem U-förmigen Tank kombiniert werden. Die Abteilungen 1 und 2 haben auf Mitte Schiff einen Mittellängsträger der Mannlochöffnungen enthält. Das Modell kann durch insgesamt 10 externe Öffnungen geflutet werden (vgl. gelbe Öffnungen in Abb.3): Ein Bodenleck in Abteilung 1, drei Seitenlecks in den Abteilungen 11,14 und 15 sowie vier Speigatte und eine Bug- und Heckpforte auf dem Fahrzeugdeck (Abteilung 22). Die Boden- und Seitenlecks sind auf kreisförmigen Flanschen angeordnet, um die vertikale Position und Leck-

größe im Modellversuch variieren zu können. Die Lecks werden im Modellversuch mit einem Stöpselmechanismus geöffnet. Des Weiteren verfügt das Modell über 27 interne Öffnungen (vgl. rote Öffnungen in Abb.3), die je nach Leckfall mit Klebeband geschlossen oder geöffnet sein können.

## Messtechnik

Im Modellversuch wurden die Füllstände in den gefluteten Abteilungen, die Schwimmage des Modells und der Druck in den Doppelbodenabteilungen gemessen. Abbildung 4 gibt zeigt eine Prinzipskizze der installierte Messtechnik.

Die Messsysteme sind über eine Leiterplatte an einen Bordrechner angeschlossen, auf dem alle Messwerte verarbeitet und gespeichert werden. Die Steuerung der einzelnen Messsysteme erfolgt extern über eine WLAN Verbindung zum Bordrechner. Die Stromversorgung der gesamten Bordelektronik erfolgt über drei Lithium-Polymer-Akkus. Durch die autonome Stromversorgung und Datenverarbeitung kann das Modell völlig frei schwimmen und wird somit nicht durch die Messtechnik beeinflusst.

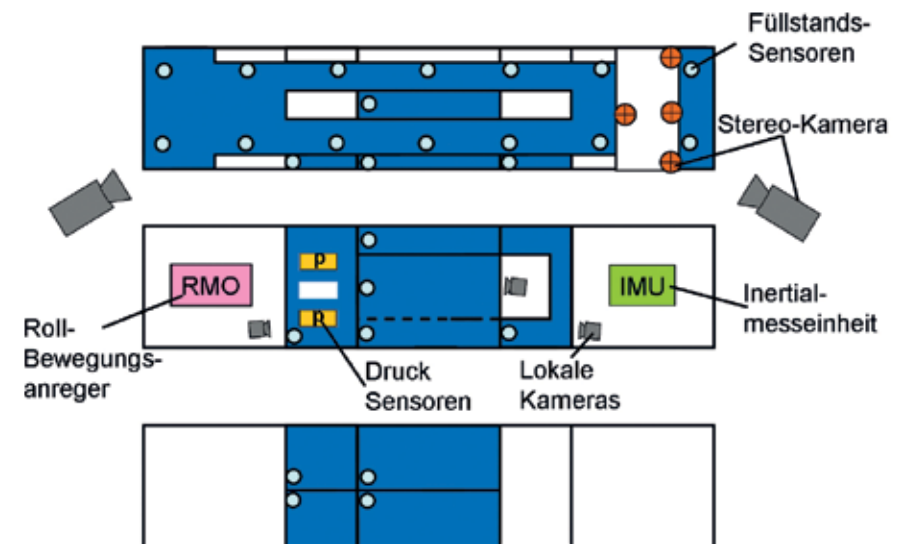


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau der Messtechnik.

## Füllstandsmessung

Das Modell ist mit insgesamt 26 resistiven Füllstandssensoren ausgestattet, die aus jeweils zwei Drähten bestehen und in der Forschungswerkstatt der

TUHH entwickelt wurden. Das Messprinzip basiert auf einer Korrelation zwischen dem Füllstand und dem elektrischem Widerstand am Sensor. Wird die Sonde mit Wasser benetzt, fließt ein Strom zwischen den beiden Drähten. Mit steigendem Füllstand sinkt der Widerstand und steigt die Stromstärke zwischen den beiden Drähten. Die Widerstandsänderung ist somit proportional zur Spannungsänderung am Sensor. Der Zusammenhang zwischen absoluter Füllhöhe und Spannung wird aus der Kalibrierung abgeleitet. Die Kalibrierung wurde für jeden Sensor mit dem Tankwasser der Modellversuche durchgeführt um vergleichbare Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur und Salzgehalt des Wassers) zu erhalten. Das beschriebene Messverfahren erlaubt im Prinzip eine zuverlässige Ermittlung der Füllstände, ist jedoch sensitiv in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Sensoren. Um die Wechselwirkung zwischen benachbarten Sensoren zu vermeiden, werden jeweils 4 Füllstandssensoren zeitversetzt angesteuert.

Des Weiteren wird die Flutung in ausgewählten Abteilungen durch lokal installierte Hochgeschwindigkeitskameras aufgezeichnet. An den Seitenwänden der Abteilungen ist ein Raster aufgebracht, mit dem der gemessene Füllstand anhand der Kameraaufzeichnung verifiziert werden kann.

### Messung der Schwimmlage

Die Bewegung und Schwimmage des Modells wird über eine Inertialmess-einheit (kurz IMU) und ein Stereo-Kamerasystem erfasst. Die IMU ist mit drei faseroptischen Kreisel und drei Beschleunigungsmessern ausgestattet, die paarweise um 90° versetzt zu einander installiert wurden. Die Abtastrate der Sensoren beträgt 221 Hz. Aus den Sensoren folgend direkt die Drehraten und Beschleunigungen entlang der drei Raumrichtungen. Die Lage (Position in Längs-, Quer- und Vertikalrichtung und entsprechenden Drehwinkel) lässt sich mit der IMU nicht erfassen, da die Erdbeschleunigung eine Mittelpunkt-sabweichung der Sensoren zur Folge hat, die zu einem erheblichen Drift-Fehler in den integrierten Lageparametern führt [3]. Aus diesem Grund wird zur Erfassung der Schwimmage das Stereo-Kamerasystem verwendet. Das Messprinzip des Kamerasystems basiert auf einer visuellen Erfassung eines optischen Merkmals, das aus 4 punktförmigen Lichtquellen besteht (vgl. Abb. 4). Die Punktquellen werden durch einen Vergleich der Kamerabil-der zueinander in Beziehung gesetzt und mit einem Triangulationsverfahren die Lageparameter berechnet [3]. Die Abtastrate des Stereo-Kamerasystems beträgt 10 Hz.

### Drucksensoren

Die beiden hinteren Doppelbodenabteilungen sind mit jeweils einem piezo-resistiven Drucksensor ausgestattet, der den relativen Druck unterhalb der Tankdecke misst. Das Messprinzip basiert auf der Änderung des elektrischen Widerstands durch die Verformung einer Halbleitermembrane infolge des Druckanstiegs in den Doppelbodenabteilungen.

### Bewegungsanreger

Im Hinterschiff ist weiterhin ein Bewegungsanreger installiert, mit dem das Modell in den dynamischen Leckfällen zu einer periodischen Rollbewegung angeregt wird. Der Bewegungsanreger besteht aus zwei gegenläufig rotierenden Massen, die sich jeweils in Querrichtung zum gleichen Zeitpunkt überschneiden und von einem Elektromotor angetrieben werden. Die Frequenz des Rollmoments wird über die Spannung des Elektromotors eingestellt.

### Modellversuchskampagne

Abbildung 5 zeigt den Umfang der durchgeführten Modellversuchskampagne.

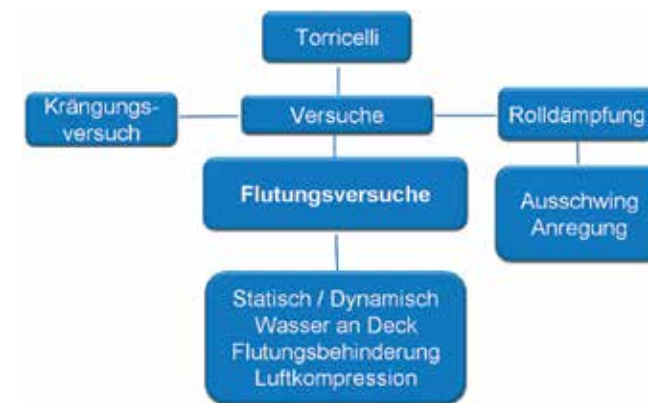


Abb. 5: Umfang der Modellversuchskampagne.

Die Modellversuche umfassen

- Krängungs-Versuche zur Bestimmung des Gewichtschwerpunktes,
- Rolldämpfungs-Versuche zur Ermittlung der Rolldämpfung und der

Trägheitsradien unter Berücksichtigung des hydrodynamischen Massenanteils,

- Torricelli-Versuche zur Bestimmung des empirischen Durchflußwiderstandsbeiwertes,
- Statische und dynamische (mit Rollanregung) Flutungsversuche mit Flutungsbehinderung durch Einbauten, symmetrischer/asymmetrischer Flutung von 1-9 Abteilungen, Luftkompression im Doppelboden, Wasser auf dem Fahrzeugdeck.

Insgesamt wurden 15 Flutungsversuche durchgeführt von denen zwei im folgenden Kapitel exemplarisch beschrieben werden.

### Leckfall mit statischer Ausgangsschwimmlage

Abbildung 6 zeigt den Flutungsprozess eines Leckfalls mit Flutungsbehinderung Beispiel von Abteilung 15.

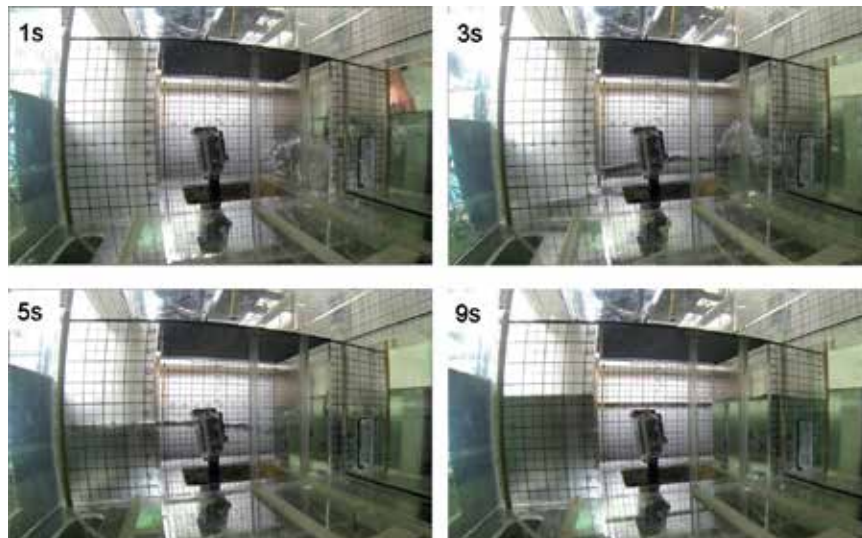


Abb. 6: Flutung der Abteilung 15 zum Zeitpunkt 1s, 3s, 5s und 9s nach Öffnung des Lecks.

Der Schwimmkörper befindet sich zu Beginn in der statischen Gleichgewichtslage, ohne Trimm und Krängung.

Kurz nach dem Öffnen des Lecks entsteht ein freier Wasserstrahl, der an der inneren Tankwand von Abteilung 15 aufsteigt. Der Flutungsprozess ist zu

diesem Zeitpunkt durch deutlich Spritzer und Luftblasenbildung gekennzeichnet (vgl. Zeitschritt 3s in Abb. 6). Infolge der Flutungsbehinderung sammelt sich das Wasser zu Beginn auf der Steuerbordseite woraus ein krängendes Moment entsteht (außermittiger Gewichtsschwerpunkt), dass den Schwimmkörper nach etwa 3s in eine deutliche Neigung versetzt. Bei fortschreitender Flutung findet zunehmend ein Ausgleich der Füllstände zwischen Backbord und der Steuerbordseite statt. Innerhalb der Abteilung bildet sich nach etwa 5s kurzzeitig eine Welle, die den Schwimmkörper zur Backbordseite rollen lässt. Nach dem Ausgleich der Füllstände steigt der Wasserspiegel in der Abteilung quasistatisch an (vgl. Zeitschritt 9s), bis der Schwimmkörper nach etwa 12s seine Gleichgewichtslage erreicht.

Abbildung 7 einen Vergleich des gemessenen und berechneten Rollwinkels über der Zeit.

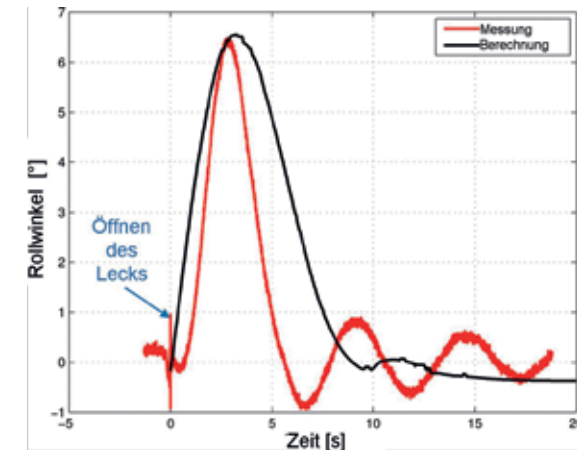


Abbildung 7: Statische Flutung von Abteilung 15.

Die Flutungsbehinderung und Energiedissipation im Querflutungskanal wurde in der quasistatischen Methode durch zwei Öffnungen mit entsprechendem Widerstandsbeiwert modelliert. Der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Rollwinkel zeigt, dass der „kritische“ Zwischenflutungszustand von der quasi statischen Flutungsmethode im Betrag richtig prognostiziert wird. Allerdings weist der berechnete Rollwinkel zu Beginn der Flutung einen Zeitversatz zum Modellversuch auf, da die quasi-statische Methode nicht die Massenträgheit und dynamische Flüssigkeitsbewegung erfasst. Des Weiteren zeigt der Vergleich, dass die Rollbewegung des Schwimmkörpers im Modellversuch deutlich schneller erfolgt als in der Berechnungsmethode. Der gesamte Flutungsvorgang induziert eine Rollbewegung des Schwimmkörpers um seine Gleichgewichtslage, die ebenfalls von der quasistatischen Methode nicht erfasst wird.



## Leckfall mit dynamischer Ausgangsschwimmlage

In folgenden wird die Flutung von Abteilung 15 bei dynamischer Ausgangsschwimmlage betrachtet. In diesem Fall wird der Schwimmkörper durch den Bewegungsanreger während der Flutung zu einer Rollbewegung angeregt.

Abbildung 8 zeigt Ausschnitte des Flutungsprozesses zu den Zeitschritten 1s, 3s, 5s und 9s nach Öffnen des Lecks.

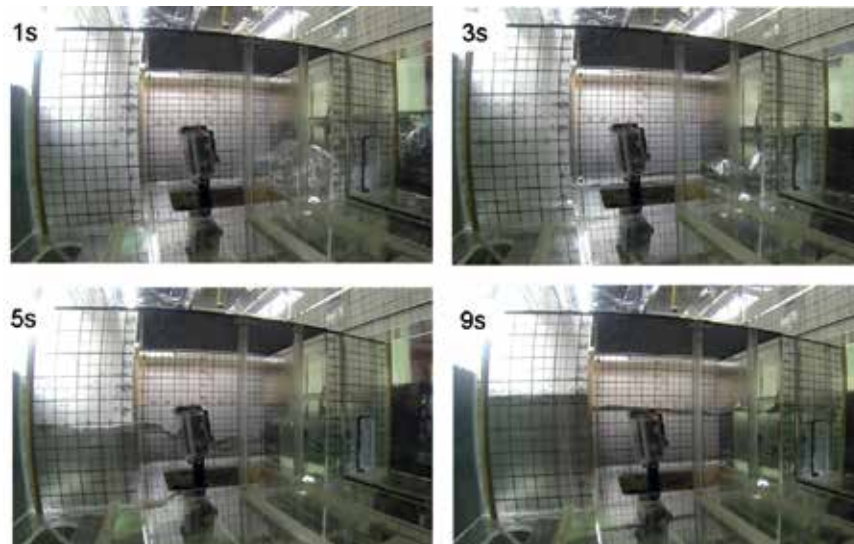


Abb. 8: Dynamische Flutung von Abteilung 15.

Der Vergleich zur Abbildung 6 zeigt, dass das Wasser deutlich anders verteilt ist als im statischen Fall (vgl. z. B. Zeitschritte 3s und 5s). In der Abteilung bildet sich eine dynamische Wasserbewegung (Wellenbewegung) aus, die einen Phasenversatz zur Anregung aufweist (vgl. 5s in Abb. 8). Abbildung 9 zeigt den Rollwinkel für die Flutung von Abteilung 15 mit Rollbewegungsanregung.

Das Leck wurde im Maximum der Rollbewegung geöffnet um den Einfluss auf die Schiffsbewegung so gering wie möglich zu halten. In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die Rollbewegung zu Beginn im Wesentlichen durch die induzierte Bewegung des Bewegungsanreger gekennzeichnet ist. Nach ca. 5s dämpft das Wasser zunehmend die Rollbewegung und verschiebt weiterhin die Rolleigenperiode des Schwimmkörpers hin zu kleinen Wellenlängen. Dadurch läuft Bewegungsanreger zu schnell um eine signifikante Rollbewegung erzeugen zu können. Der Vergleich mit dem statischen Leckfall zeigt, dass sich der Bewegungsverlauf grundsätzlich unterscheidet, da im dynamischen Fall kein „kritischer“ Zwischenflutungszustand auftritt bzw. der größte Rollwinkel zu

Beginn des Leckfalls vorliegt. Die Bewegung bzw. der Flutungsprozess wird somit im dynamischen Fall nicht so stark durch die Flutungsbehinderung beeinflusst wie im statischen Fall. Die Flutungszeit (bis zum Erreichen des maximalen Füllstands in Abteilung 15) ist hingegen für beide Fälle vergleichbar (beträgt etwa 12s). Das bedeutet, dass bei diesem Leckfall die dynamische Wasserbewegung innerhalb der Abteilung zwar den Flutungsverlauf jedoch nicht die Zeit bis zum Erreichen der Endschwimmlage beeinflusst.

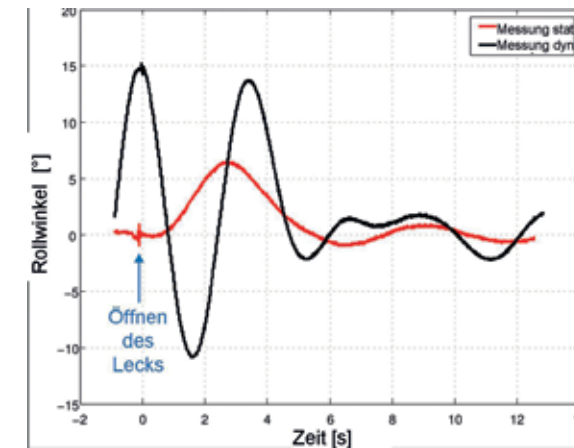


Abb. 9: Rollwinkel bei Flutung von Abteilung 15 mit Rollanregung.

## Stabilitätskriterien zur Bewertung großer Flüssigkeitsoberfläche auf Fahrzeugdecks

Unfalluntersuchungen wie die der „MV Estonia“, „Salam Boccaccio 98“ oder der „Herald of Free Enterprise“ haben gezeigt, dass typische Versagensszenarien im Intakt-Fall auftreten. Dies gilt insbesondere auch für Brandfälle, bei denen mit einer erheblichen Wassermenge durch Löschwasser auf dem Fahrzeugdeck zu rechnen ist. Von daher erscheint es logisch, den Fall „Wasser-an-Deck“ eher der Intakt- als der Leckstabilität zuzuordnen, weil fast alle relevanten Unfälle keinerlei Beschädigung unter der Wasserlinie hatten. Aus diesem Grund wurde ein neues Intaktstabilitätskriterium mit Wasser an Deck entwickelt. Die prinzipielle Vorgehensweise besteht aus zwei Schritten:

1. Ermittlung einer anzusetzenden Entwurfswassermenge auf dem Fahrzeugdeck.
2. Berechnung der statischen Hebelarme einschließlich dieser Wassermenge und Bewertung der Stabilität mit ausgewählten Kriterien.



Zur Analyse der anzusetzenden Wassermenge auf dem Fahrzeugdeck wurden verschiedene RoPax-Schiffe der Flensburger Schiffbau-Gesellschaft (FSG) untersucht, welche die deterministischen Leckstabilitätsanforderungen nach SOLAS 90 und zusätzlich die Anforderungen des Stockholmer Abkommens erfüllen. Betrachtet man nun relevante Unfälle, dann stellt man fest, dass sich das Schiff in einem gefährlichen Zustand befand, die Crew dies aber nicht erkannte und diesen Zustand solange hat andauern lassen, bis sich die Stabilität des Schiffes so stark verringert hatte, dass meist eine irreversible Situation vorlag. Der Ansatz für die anzusetzende Wassermenge muss also anschaulich Stabilitätsänderungen des Schiffes bewerten. Als Bewertungsmaßstab wird hier die Änderung der Rollperiode herangezogen.

Daher wurden die ausgewählten Schiffe mit numerischen Rollausschwingversuchen untersucht, bei denen für jedes Schiff die Wassermenge auf dem Fahrzeugdeck sukzessive erhöht wurde. Der Verlauf der Rolleigenperiode über der akkumulierten Wassermenge zeigt, dass die Rolleigenperiode zu Beginn nur leicht zunimmt. Nach Erreichen einer „kritischen“ Wassermenge nimmt die Rolleigenperiode mit zunehmender Wassermenge stark zu, bis das Schiff schließlich kentert. Die Analyse des Rollausschwingversuches zeigt weiterhin, dass die Entwürfe ausreichend Stabilitätsreserven aufweisen, sofern die Rolleigenperiode kleiner als das zweifache der Rolleigenperiode im Ausgangszustand ist. Dieser Wert korreliert etwa mit der „kritischen“ Wassermenge für die untersuchten Entwürfe. Aus diesem Grund kann die Verdoppelung der Rolleigenperiode als erster Richtwert zu Beurteilung der anzusetzenden Wassermenge und Bewertung der Stabilität an Bord durch die Crew an Deck herangezogen werden.

Zur Bewertung der Stabilität wurden die Hebelarme der untersuchten Schiffe einschließlich dieser Wassermenge berechnet und die resultierenden Stabilitätseigenschaften bewertet. Aus den Stabilitätseigenschaften wurden vorläufige Kriterien bezüglich des maximalen Krängungswinkels, des maximalen Hebelarms und der Fläche unter der Hebelarmkurve abgeleitet. Die Kriterien sind mit dem Sicherheitsniveau aus SOLAS 90 und Stockholabkommen konsistent, da alle Schiffe mit SOLAS 90 und Stockholmer Abkommen auch die neuen Kriterien erfüllen. Weitere Ausführungen zur Methodik und den angewendeten Kriterien sind in [2] enthalten.

## Fazit und Ausblick

Das Verbundvorhaben LESSEO hat eine numerische Methode erarbeitet, die basierend auf einem quasistatischen Berechnungsansatz Flutungsvorgänge von leckgeschlagenen Schwimmkörpern im Zeitbereich abbilden und analysieren kann. Die Methode ist ausreichend genau soweit die Dynamik des

eingedrungenen Wassers, beispielsweise durch große freie Flüssigkeitsoberflächen, die durch die Bewegungen des Schiffes im Seegang angeregt werden, nicht von Bedeutung ist.

Zur Untersuchung freier Flüssigkeitsoberflächen sind im Projekt Methoden weiterentwickelt worden, die Wasserdynamik in Tanks mittels Flachwassergleichungen modellieren. Dabei wurden zwei Ansätze getestet.

Zur Validierung der entwickelten numerischen Methoden sind Modellversuche mit einem eigens entworfenen Schwimmkörper, der typische Unterteilungsschemata moderner RoRo-Fahrgastschiffe nachbildet, durchgeführt worden.

Die durchgeführte Modellversuchskampagne biete eine umfangreiche Datenbasis zur Validierung von quasistatischen und dynamischen Flutungsmodellen. Die Modellversuche umfassen sowohl symmetrische, unsymmetrische und dynamische Leckfälle von schiffbautypischen Abteilungen und stellen somit eine wertvolle Ergänzung zu den bisher durchgeführten Modellversuchen dar. Der entwickelte Schwimmkörper bietet in seiner Konstruktion weitere Freiheitsgrade, die in Anschlussvorhaben genutzt werden könnten. Beispielsweise könnten „Verzweigungsprobleme“ durch eine Variation des vertikalen Gewichtsschwerpunkts, Leckfälle mit Stampferregung oder weitere Leckfallkombinationen untersucht werden.

Die vorläufige Auswertung der Füllstandsmessung hat gezeigt, dass trotz der räumlichen Trennung eine Wechselwirkung zwischen den Sensoren auftritt sobald mehr als vier Sonden benetzt werden. Dies ist vor allem bei Leckfällen mit mehr als 3 Abteilungen der Fall. Für zukünftige Versuche könnte eine Erweiterung der zeitversetzten Ansteuerung auf mehr als vier Sensoren ausgearbeitet werden (Multiplexverfahren), um auch Füllstände in umfangreicheren Leckfällen zuverlässig messen zu können. Als Alternative zum Multiplexverfahren könnten die Sensoren mit einem Faradayschen Käfig ausgestattet werden, der die elektrischen Felder der einzelnen Sensoren abschirmt. In diesem Fall ist jedoch mit einer weiteren Flutungsbeeinträchtigung durch die Sensoren und einem erhöhten Fertigungsaufwand zu rechnen. Weiterhin könnten Füllstandsmessungen durch Druck oder Ultraschallsensoren in Betracht gezogen werden.

Die Auswertung der Modellversuche hat gezeigt, dass mit der quasistatischen Flutungsmethode im Prinzip auch „kritische“ Zwischenflutungszustände berechnet werden können. Der gemessene Rollwinkel konnte in dem dargestellten Leckfall mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit prognostiziert werden. Allerdings erfordert die Definition des numerischen Modells empirische Erfahrungswerte, die aus den Modellversuchen abgeleitet wer-

den können. In Bezug auf die Flutungsgeschwindigkeit / Zeit bis zum Erreichen der Endschwimmlage ist die Prognosegenauigkeit der quasistatischen Methode geringer. Die Auswertung der Modellversuche hat gezeigt, dass die prognostizierte Flutungszeit teilweise um bis zu 30% von den Messwerten abweicht [9]. Dies hängt stark von der Art der betrachteten Leckfälle ab. Die längeren in den Modellversuchen beobachteten Flutungszeiten könnten durch zusätzliche Energiedissipation infolge von Spritzern, Wellenbewegung, oder Reibung an den Tankwänden, bzw. eine rezirkulierende Wasserströmung in den Leckräumen hervorgerufen werden. Zusätzlich hat natürlich die tatsächliche Durchflussrate durch die Lecköffnung großen Einfluss, die häufig aufgrund lokaler Strömungsvorgänge geringer ausfällt als nach der im freien Ausfluss ermittelten Torricelli-Zahl zu erwarten wäre. Des Weiteren hat die Auswertung der Modellversuche gezeigt, dass die dynamische Schiffsbewegung vor allem bei sehr schnellen Flutungsvorgängen in der ersten Phase nach einer Beschädigung einen Einfluss auf den Flutungsvorgang hat. Die Krängungszunahme erfolgt bei Leckfällen mit relativ schnellen Flutungsvorgängen/großen Rollgeschwindigkeiten „stufenförmig“, da der Schwimmkörper kurzzeitig eine dynamische Gleichgewichtslage erreicht. In diesen Fällen spielt die Trägheit des Schwimmkörpers und damit die Dynamik dieses Vorganges eine große Rolle. Aus diesem Grund soll die quasistatische Methode im nächsten Schritt um ein dynamisches Modell erweitert werden, um auch den Einfluss der dynamischen Schiffsbewegung besser abbilden zu können.

Die entwickelten Stabilitätskriterien beschreiben eine Möglichkeit, wie das Sicherheitsniveau für aktuelle Fahrgastschiffentwürfe hinsichtlich großer Wassermengen auf Fahrzeugdecks verbessert werden könnte. Die definierten Kriterien sind konsistent zum Sicherheitsstandard, der sich aus der Anwendung der SOLAS 90 – Regeln in Kombination mit den Wasser-an-Deck Forderungen nach dem Stockholm Abkommen ergibt, da alle untersuchten Schiffe, die diesen Standard erfüllen, auch die neuen Sicherheitskriterien erfüllen. Die Kriterien wurden als Intakstabilitätskriterien definiert und beschreiben somit eine Stabilitätsreserve bei großen Wassermengen auf den Fahrzeugdecks im Intaktfall z. B. infolge von Löschwasser. Zurzeit werden die erarbeiteten Kriterien anhand von weiteren Fahrgastschiffentwürfen validiert und gegebenenfalls erweitert.

## Literatur

- [1] Valanto, P.: Research for the Parameters of the Damage Stability Rules including the Calculation of Water on Deck of Ro-Ro Passenger Vessels, for the amendment of the Directives 2003/25/EC and 98/18/EC. HSVA Report No. 1669, HSVA, Hamburg, 2009
- [2] Krüger, S., Nafouti, O.: Development of an Intact Stability Criteria for RoRo Passenger Against Capsizing due to Trapped Water on Vehicle Deck. Diplomarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2014
- [3] Pick, M.: Ein Beitrag zur numerischen und experimentellen Untersuchung extremer Schiffsbewegungen. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, 2009
- [4] Dillingham, J. Motion Studies of a Vessel with Water on Deck Marine Technology, 1981
- [5] Petey, F. Berechnung der Flüssigkeitsbewegung in teilgefüllten Tanks und Leckräumen. Schriftenreihe Schiffbau, 1984
- [6] Kurganov, A. & Petrova, G. A Second-Order Well-Balanced Positivity Preserving Central-Upwind Scheme for the Saint-Venant System. Communications in Mathematical Sciences, 2007, 5, 133-160
- [7] Dankowski, H. A Fast and Explicit Method for the Simulation of Flooding and Sinkage Scenarios on Ships. Dissertation. Hamburg University of Technology, Institute of Ship Design and Ship Safety, 2013
- [8] Dankowski, H. & Russel, R. & Krüger, S. New Insights into the Flooding Sequence of the Costa Concordia Accident. Conference Proceedings. OMAE 2014. San Francisco. 2014
- [9] Dankowski, H. & Krüger, S. & Kluwe, F. & Lorkowski, O. An Experimental Study on Progressive and Dynamic Damage Stability Scenarios. Conference Proceedings. OMAE 2014. San Francisco. USA. 2014
- [10] Dankowski, H. & Krüger, S. Progressive Flooding Assessment of the Intermediate Damage Cases as an Extension of a Monte-Carlo based Damage Stability Method. Conference Proceedings. PRADS 2013. Changwon City, Korea. 2013
- [11] Dankowski, H. & Dilger, H. Investigation of the Mighty Servant 3 Accident by a Progressive Flooding Method. Conference Proceedings. OMAE 2013. Nantes. Frankreich. 2013
- [12] Dankowski, H. & Krüger, S. An Explicit Progressive Flooding Simulation Method. Conference Proceedings. STAB 2012. Athen. Griechenland. 2012
- [13] Dankowski, H. & Krüger, S. & Teuscher, C. Numerical Investigations of the Capsizing Sequence of SS HERAKLION. Conference Proceedings. STAB 2012. Athen. Griechenland. 2012

## AKTos – Aktive Kontrolle von Torsionsschwingungen durch Kupplungselemente

Förderkennzeichen: 03SX313

Dipl.-Ing. Jochen Exner (CENTA Antriebe GmbH, Haan)  
Dr. Ing. Mahamudul Hasan (CENTA Antriebe GmbH, Haan)  
Dipl.-Ing. Daniel Schlote (Fraunhofer LBF, Darmstadt)

### Aufgabenstellung

Dem Projekt AKTos liegt die Aufgabe zugrunde, erstmalig eine aktive, d. h. eine sich selbstadaptierende Kupplungskomponente im dieselmotorischen Antriebsstrang von Schiffen zu entwickeln. Diese Kupplungskomponente soll störende Torsionsschwingungen bzw. Drehungleichförmigkeiten reduzieren, indem entweder die Basiskennwerte einer hochelastischen Kupplung, d. h. Steifigkeit und Dämpfung, situationsgerecht und geregelt so verändert werden, dass eine optimale Kompensation erfolgt, oder dass durch eine zeitlich veränderliche Drehmomentschwingamplitude ein Gegensignal zur Anregung des Motors in der Summe einen möglichst guten Ausgleich nach außen bewirkt.

### Lösungsweg und Lösungsbeschreibung

Zur Lösung der Aufgabe wurde verstärkt die Simulationstechnik eingesetzt, indem ein speziell für dieses Projekt definierter Referenzantriebsstrang (Abb. 1: Dieselmotor ca. 500kW, die neue aktive Kupplung und im Vergleich eine klassische Ringelementkupplung, Übersetzungsgetriebe, Propeller) möglichst detailliert in seinem schwingungstechnischen Verhalten abgebildet wurde.

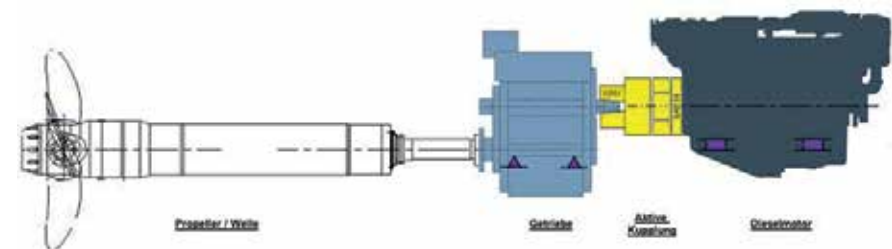


Abb. 1: Referenzantriebsstrang, Anlagenschema in offener Bauweise

Die Funktionen und das multiphysikalische Verhalten des aktiven Kupplungsmoduls, sowie verschiedener alternativer Lösungsansätze, wurden dabei umgesetzt. Anhand von Komponententests, in denen das Systemverhalten im kleinen Umfang verifiziert werden konnte, war eine Verfeinerung der Simulationsmodelle schrittweise möglich. Auf Basis dieser Vorarbeiten war schließlich eine Festlegung auf ein favorisiertes Lösungskonzept für den Aktor, als auch das aktive Kupplungssystem möglich. Die favorisierte Lösung bestand aus einer sequenziellen Anordnung einer ein- oder zweireihigen passiven Kupplung und einem neuartigen elektrodynamischen Aktormodul. Letzteres ermöglichte die Einleitung von frequenzabhängigen Wechseldrehmomenten bis 600Nm in das Wellensystem. In Verbindung mit der hohen Dynamik zur Auflösung von mechanischen Schwingfrequenzen bis 300 Hz wäre damit eine Kompensation der Anregungen bis zu einer 12ten Motorordnung erreichbar.

Nachfolgend erfolgte die konstruktive Umsetzung, die Beschaffung der Einzelkomponenten, schließlich die Montage und Testerprobung des Aktormodul in einem dynamischen Verspannungsprüfstand. Eine Reihe von Standardtests, das Temperaturverhalten, und wichtige Kennwerte für den regelungstechnischen Abgleich konnten so ermittelt werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurde dieser Lösungsansatz schließlich als funktionsfähiger aktiver Kupplungsprototyp aufgebaut und im o.g. Referenzantriebsstrang ausführlich getestet. Die Systemeigenschaften konnten im Vergleich zu heutigen passiven Kupplungen bestimmt werden.

## Ergebnisse

Die Funktion und die Fähigkeit des neu entwickelten aktiven Kupplungssystems Schwingungen in dieselmotorischen Antriebssträngen deutlich zu reduzieren, konnte im Projektverlauf eindrucksvoll gezeigt werden. Das Kernergebnis, d. h. der Grad einer Reduktion der störenden Schwingungsamplituden übertrifft die Erwartungen. Konkret konnten die Schwingamplituden im Normalbetrieb bis zu 50% und im Zündaussetzerbetrieb bis zu 90% reduziert werden, jeweils verglichen mit einer bereits optimalen Auslegung mit passiven Gummiringkupplungen. Der real vermessene Aktor und Kupplungsaufbau hat aus dem unstetigen Drehzahl- bzw. Drehmomentverlauf des Dieselmotors nahezu einen konstanten Verlauf gemacht, der eher dem einer elektrischen Antriebsmaschine nahe kommt. Die damit massiv reduzierten Drehschwingungen lassen sich vorteilhaft in Laufruhe, reduzierten Sicherheitsfaktoren (vgl. Lastüberhöhungsfaktoren bei vielen Auslegungsnormen) und damit wenigstens langfristig in kleineren Baugrößen beispielsweise von Getrieben, und damit Massen, umsetzen.

Das elektrodynamische Aktorprinzip zeigt einen hohen Grad an Praxistauglichkeit, und zwar in Bezug auf das hohe Leistungsniveau von ca. 500kW bzw. 3000Nm Nennantriebsmoment, als auch in Bezug auf eine wirtschaftliche Umsetzung einer später geplanten Serienkomponente.

Die Schnelligkeit der Regelung zwischen der mechanischen Struktur, der Sensorik, der regelungstechnischen Verarbeitung zur Bestimmung einer Aktorkraft, sowie der Aktorik selbst, ist hervorzuheben. So reagiert der Aktor, je nach zugrundeliegendem Regelungskonzept, in nur weniger als 500 msec auf einen neuen Lastfall, was in der Praxis quasi als Echtzeit beschrieben werden kann.

Ein weiterer Nutzen hat sich in der Anwendung der modelbasierten Simulation mittels von Softwareprogrammen wie matlab/simulink oder maplesim herausgestellt. Diese Art der Simulation hat sich als sehr präzise in der Vorhersage von späteren praktischen Messergebnissen bewährt. Das Nebenziel zur Verifikation einer derartigen Entwicklungsmethodik für aktive Systeme ist damit erreicht.

## **PREMAN – Maßstabseffekte und Umwelteinflüsse bei der Vorhersage des Manövrierverhaltens seegehender Schiffe**

Förderkennzeichen: 03SX324

A. Cura Hochbaum, J. Schwarz-Beutel, L. Koopmann (TU Berlin)  
O. el Moctar, J. Höpken, U. Lantermann (Universität Duisburg-Essen)  
J. Lassen (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH)

### **1. Motivation**

Die klassische Vorgehensweise, um die Manövriereigenschaften eines neuen Entwurfs zu bestimmen, besteht darin, Manövrierversuche in einem Schlepptank oder Manövrierbecken durchzuführen. Hierbei kann es sich um Versuche mit einem frei fahrenden Modell oder um Kraftmessungen bei erzwungenen Bewegungen mit einem gefesselten Modell handeln. Üblicherweise wird bei der Extrapolation der Ergebnisse aus Manövrierversuchen auf die Großausführung des Schiffes von der Annahme ausgegangen, dass Effekte, die aus der Nichteinhaltung des Reynold'schen Ähnlichkeitsgesetzes entstehen (sog. Maßstabseffekte), sich gegenseitig aufheben, und die Versuchsergebnisse werden direkt auf die Großausführung übertragen. Es besteht nach wie vor keine genaue Kenntnis über das Ausmaß der durch die Maßstabseffekte verursachten Fehler. Die Klärung dieser Frage ist umso wichtiger, als dass Modellversuchsergebnisse in manchen Fällen ein besseres Manövrierverhalten des Schiffes zeigen, als in Wirklichkeit.

Im Folgenden werden auszugsweise Ergebnisse des Verbundvorhabens PREMAN dargestellt, wobei die Ergebnisse in vollem Umfang in den Abschlussberichten der Teilprojekte dargestellt werden.

### **2. Methodik**

Es können im Wesentlichen zwei Maßstabseffekte unterschieden werden:

1. Im Modellmaßstab ist die Reynoldszahl um zwei Größenordnungen kleiner als in der Großausführung. Hierdurch sind die Grenzschicht und Ablösungserscheinungen überzeichnet, was eine kleinere Anströmgeschwindigkeit des Ruders und damit eine geringere Ruderwirksamkeit zur Folge hat.



2. Gegenüber der Großausführung unterliegt das Modell einem verhältnismäßig größeren Zähigkeitswiderstand, was bei Selbstpropulsion eine erhöhte Belastung des Propellers und damit einhergehend eine stärkere Anströmung des Ruders zur Folge hat, sofern sich dieses im Propellerstrahl befindet. Die Ruderwirksamkeit wird hierdurch im Modellversuch künstlich erhöht.

Darüber hinaus können weitere Maßstabeffekte auftreten. Aus der im Modell höheren Schubbelastung des Propellers kann beispielsweise eine Veränderung der Begradigung der Ruderanströmung resultieren. Ferner werden die Seitenkräfte von Ruder und Rumpf von der Reynoldszahl beeinflusst. Darüber hinaus kann im Gegensatz zum Modellversuch in der Großausführung am Ruder Kavitation auftreten. Die beiden erstgenannten, entgegengesetzt wirkenden Effekte können sich im Falle eines Einschraubenschiffes ausgleichen. Die übliche Wahl des Selbstpropulsionspunktes des Modells (MSPP) statt des Selbstpropulsionspunktes der Großausführung (SSPP) kann jedoch, vor allem bei Zweischaubenschiffen, zu einem besseren Manövrierverhalten des Modells führen, als dies die Großausführung tatsächlich widerspiegelt.



Abb. 1: Modell des Einschraubenschiffes beim gefesselten Versuch.

Eine zentrale Frage des Forschungsprojektes war, ob der Modellversuch im Modell-Selbstpropulsionspunkt oder Schiff-Selbstpropulsionspunkt durchzuführen ist. Zur Klärung dieser Frage wurden bei der HSVA umfangreiche Versuche mit gefesseltem (siehe Abb. 1) sowie frei fahrendem (siehe Abb. 2) Modell eines Ein- sowie eines Zweischaubenschiffes durchgeführt. Während im gefesselten Versuch der Propulsionspunkt frei gewählt werden kann, musste für die Versuche mit frei fahrendem Modell eine neue Versuchstechnik entwickelt werden, um den Propeller mittels einer Zugkraft zu entlasten.

Eine weitere zentrale Fragestellung des Projektes war, mit welcher Güte die numerische Vorhersage des Manövrierhaltens von Schiffen möglich ist. Hierfür wurden zwei numerische Verfahren weiterentwickelt. Im Anschluss wurden RANS-basierte Simulationen der frei fahrenden und gefesselten Manövrierversuche durchgeführt (sog. virtuelle Tests). Die virtuellen freien Tests

wurden von der Universität Duisburg-Essen, die virtuellen gefesselten Tests von der Technischen Universität Berlin durchgeführt.



Abb. 2: Das frei manövrierende Modell des Zweischaubenschiffes.

Für beide Schiffe wurden umfangreiche Großausführungsversuche durchgeführt, um eine Überprüfung der verschiedenen Manövrierprognoseverfahren zu ermöglichen (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Drehkreisversuch: Heckwasser des Einschraubenschiffes (links) und des Zweischaubenschiffes (rechts).

Im Rahmen von PREMAN wurden zudem folgende Themen behandelt:

- Einfluss der Propellerquerkräfte auf das Manövrierverhalten,
- Berücksichtigung der Maschinendynamik und deren Implementierung im Modellversuch mit frei fahrendem Modell,
- Quantifizierung der Strömungskräfte infolge Wind und Wellen.

### 3. Testfälle und Großausführungsmessungen

Umfangreiche Großausführungsmessungen auf zwei Schiffen (Hauptabmessungen siehe Tab. 1) wurden durch die großzügige Bereitstellung der Schiffe durch die Reedereien HARREN UND PARTNER und HAPAG-LLOYD ermöglicht. Die Messungen wurden vom GERMANISCHEN LLOYD, mit großer Unterstützung durch die Projektpartner, durchgeführt.

## Einschraubenschiff

Die Messfahrten mit dem Einschraubenschiff, einem 4.600 TEU Panmax-Containerschiff, fanden zwischen Kobe und Tokyo statt. Das Schiff war leicht achterlich vertrimmt. Die Tests wurden in tiefem Wasser und bei guten Wetterbedingungen (mäßiger Seegang, Wind: 4-5 Bft) durchgeführt. Es wurden zwei Drehkreis- und sieben Z Versuche gefahren.

## Zweischraubenschiff

Die Messfahrten mit dem Zweischrauben-Dockschiff fanden im Ärmelkanal vor der Mündung der Seine bei idealen Wetterbedingungen statt. Um die ausgeprägte Tidenströmung ( $\pm 1.7$  kn) korrigieren zu können, wurden in regelmäßigen Abständen Drehkreise mit  $720^\circ$  Kursänderung gefahren. Das Schiff war leicht achterlich vertrimmt. Insgesamt wurden 23 Drehkreis- und 38 Z-Versuche gefahren. Hierbei wurden ausgewählte Versuche öfters wiederholt.

Hauptabmessungen			Propellerdaten		
	Einschrauber	Zweischrauber		Einschrauber	Zweischrauber
$L_{PP}$	281,59 m	95,60 m	Art	FP	CPP
B	32,00 m	19,60 m	D	8,3 m	2,4 m
$T_{AP}$	12,24 m	3,99 m	$A_E/A_0$	0,803	0,489
$T_{FP}$	10,90 m	3,75 m	P/D	1,030	0,988
$c_B$	0,65	0,74	z	6	4
$v_0$	18,10 kn	10,50 kn			
$\lambda$	39,89	13,66			

Tab. 1: Hauptabmessungen und Propellerdaten der beiden Schiffe.

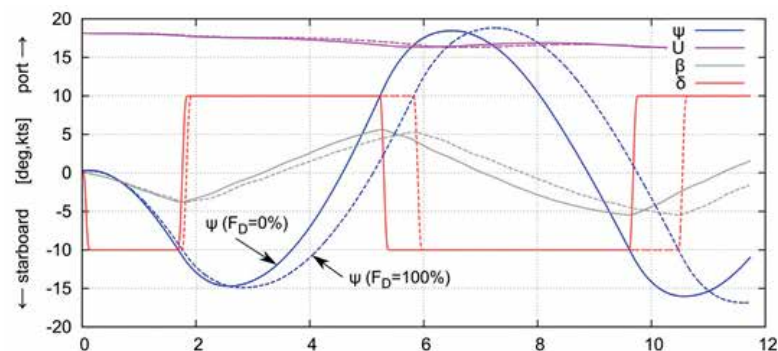


Abb. 4: Z10/10-Versuch mit dem Einschrauber.

## 4. Modellversuche HSVA

Der CPMC (Computerized Planar Motion Carriage) wird bei Versuchen mit dem frei fahrenden Modell im Wesentlichen zur präzisen Positionsverfolgung der ebenen Bewegung genutzt. Die Positionsverfolgung arbeitet dabei so genau, dass Relativbewegungen zwischen dem CPMC Kopf und dem Modell vernachlässigbar klein bleiben. Diese Voraussetzung ermöglicht die Einleitung einer äußeren Kraft in das frei fahrende Modell.

Die zur Wahl des Propulsionspunkts zusätzlich ins Modell eingeleitete Reibungsabzugskraft ist von der Geschwindigkeit abhängig. Während diese beim Propulsionsversuch konstant ist, ist sie bei Rudermanövern mit dem frei fahrenden Modell veränderlich. Daraus resultiert die Forderung, dass der Reibungsabzug dynamisch aufgebracht werden muss.

Das von der HSVA neu entwickelte, weltweit einmalige Messsystem erlaubt eine reglergesteuerte Krafteinleitung in Abhängigkeit von der gemessenen Momentangeschwindigkeit. Diese Krafteinleitung wird über die Auslenkung einer Feder gesteuert: An einem vertikalen Arm unterhalb des CPMC Kopfes besteht eine Seilverbindung zu einem Motor-Feder-System. Die eingeleitete Kraft wird an einer Kraftmessdose kontrolliert. Eine PID Regelung sorgt für die Einhaltung der gewünschten Kraft.

Es wurden Modellversuche mit dem Einschrauber und dem Zweischrauber bei unterschiedlichen Reibungsabzugsintensitäten durchgeführt.

Abbildung 4 zeigt ein Z10/10-Versuch mit dem Modell des Einschraubers bei unterschiedlichen Reibungsabzugsintensitäten (0% und 100%). Die Auswirkung auf den Überschwingwinkel ist marginal, tendenziell werden diese mit stärkerem Reibungsabzug größer. Das zeitliche Verhalten wird jedoch merkbar beeinflusst. Die Reaktion auf einen veränderten Ruderwinkel wird mit steigendem Reibungsabzug verzögert.

Abbildung 5 zeigt ein Z10/10-Versuch mit dem Modell des Zweischraubers. Die Wirkung auf den Überschwingwinkel ist wie bei den Versuchen mit dem Einschrauber sehr klein. Der zeitliche Verlauf wird beim Einschrauber-Modell stärker beeinflusst als beim Zweischrauber. Jedoch wurde das Zweischraubenmodell in einem recht kleinen Maßstab gebaut, wodurch sich Maßstabs-effekte entsprechend geringer auswirken.

Die Versuchstechnik wurde zusätzlich um die Möglichkeit der automatisierten Drehzahlregelung erweitert, um die Maschinencharakteristik des echten Schiffes während eines Manövers korrekt nachzubilden. Hierfür lässt sich nun in der Versuchsanlage eine Leistungs-, bzw. Momentenkurve der Haupt-

maschine des Schiffes hinterlegen. In der Praxis tritt beispielsweise bei Z-Versuchen mit stark gelegtem Ruder der Fall auf, dass die Propellerbelastung infolge der reduzierten Modellgeschwindigkeit stark zunimmt. In Abhängigkeit des am Modellpropeller gemessenen Drehmoments kann nun die Propellerdrehzahl so geregelt werden, dass das maximal von der Hauptmaschine mögliche Drehmoment zu keiner Zeit überschritten wird. Die Herausforderung besteht darin, die Kennlinie der Hauptmaschine zu bekommen. Für die zur Verfügung stehenden Schiffe waren die Kennlinien von baugleichen Motoren bekannt und wurden hinsichtlich der Leistung an die der Schiffe angepasst.

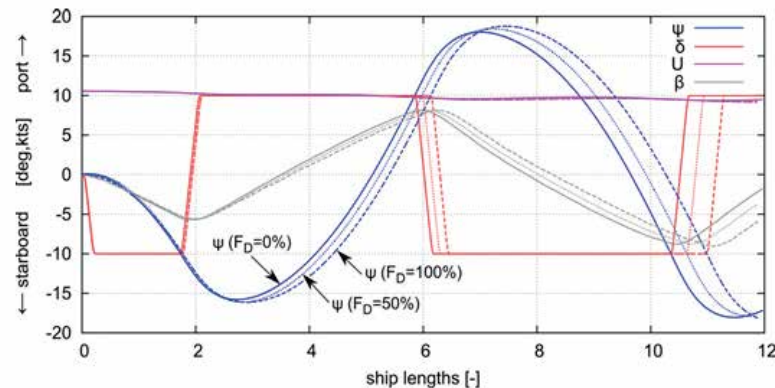


Abb. 5: Z10/10-Versuch mit dem Zweischrauber.

## 5. Virtuelle frei fahrende Versuche

Das System der Erhaltungsgleichungen für Masse und Impuls eines reibungsbehafteten inkompressiblen Fluids wird als Navier-Stokes-Gleichungen bezeichnet und lautet in Integralform:

$$\int_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho \mathbf{b} dV.$$

Hierbei bezeichnet  $\mathbf{v}$  den Geschwindigkeitsvektor,  $\mathbf{n}$  den äußeren Normaleneinheitsvektor der Oberfläche des Kontrollvolumens,  $\mathbf{T}$  den Spannungstensor und  $\mathbf{b}$  den Vektor einer Volumenkraft. Turbulente Strömungen werden beschrieben durch die Zerlegung der Strömungsgrößen in einen Mittelwert und eine Schwankungsgröße (Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-(RANS)-Gleichungen). Durch ein Turbulenzmodell wird das Gleichungssystem geschlossen und mittels eines Finite-Volumen-Verfahren diskretisiert. Die Simulationen zu den frei fahrenden Versuchen erfolgte mittels des kommerziellen Programmpakets STAR-CCM+ der Firma CD-adapco.

Direkte Manöversimulationen benötigen numerische Verfahren zur Berechnung der Schiffsbewegungen. Die planaren Bewegungen (Vorwärts-, Seitwärtsbewegung und Gieren) wurden durch globale Gitterbewegung erfasst. Die Freiheitsgrade für die Schiffsbewegungen Stampfen, Rollen und Tauschen wurden nicht berücksichtigt.

Die Propeller- und Ruderbewegungen wurden als Rotationsbewegungen berücksichtigt. Dabei wurde neben der Sliding-Interface-(SI)-Technik für die Propeller ebenfalls Multiple-Reference-Frames-(MRF) eingesetzt. Letztere Methode modelliert die Drehbewegung ohne direkte Rotation des Propeller-netzes. Das Lösungsgebiet wurde durch ein unstrukturiertes Hexaedernetz diskretisiert. An der Schiffsoberfläche wurden Prismenschichten eingesetzt. Diese erlauben eine höhere Genauigkeit der Strömungslösung um das Schiff, insbesondere in der Grenzschicht. Die Zellen wurden an einen geeigneten dimensionslosen Wandabstand  $y^+ = u^* y / \nu$  angepasst. Dabei bezeichnet  $y$  den Wandabstand zum ersten Interpolationspunkt,  $\nu$  die kinematische Viskosität und es gilt  $u^* = (\tau / \rho)^{1/2}$  mit der Wandschubspannung  $\tau$ .

Die RANS-Gleichungen sind mit den nichtlinearen Bewegungsgleichungen eines starren Körpers implizit gekoppelt, vgl. (el Moutar, et al., 2012).

Die Abmessungen des Rechengebietes betrugen  $1,5 L_{pp}$  vor dem Bug, hinter  $4,0 L_{pp}$  dem Heck und jeweils  $2,0 L_{pp}$  nach Steuer- und Backbord. Am Einstromrand wurden die Strömungsgeschwindigkeit, die turbulente kinetische Energie und die Dissipationsrate vorgegeben. Am Austrittsrand wurde der Druck vorgegeben und die Geschwindigkeiten wurden aus den benachbarten Zellen im Gebietsinneren extrapoliert. Es wurde das  $k - \epsilon - \text{RNG}$ -Modell nach (Yakhot, et al., 1992) mit Wandfunktionen eingesetzt. Die Auslenkung der freien Oberfläche wurde mit einer Volume-of-Fluid-(VOF)-Methode berücksichtigt. Sowohl für die zeitliche als auch die räumliche Diskretisierung wurden Methoden mit einer Genauigkeit zweiter Ordnung verwendet. Der dimensionslose Wandabstand betrug im Mittel  $y^+ = 60$  im Modellmaßstab und  $y^+ = 200$  in der Großausführung. Die Zeitschrittweite wurde so gewählt, dass die Courantzahl unter Eins lag.

Die Strömungssimulationen wurden in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Propulsionssimulation, dabei wurden Rumpf, Propeller, Welle und Ruder geometrisch modelliert. Nach Erreichen des Selbstpropulsionspunktes wurde im zweiten Schritt die Simulation des Manövers gestartet. Die Propellerdrehzahl war während der gesamten Simulation konstant und entsprach dem Selbstpropulsionspunkt des Modells  $MO, n_{MSPP}$  bzw. der Großausführung  $GA, n_{SSPP}$ , vgl. Abschnitt 6.



Das numerische Gitter bestand aus fünf Teilgebieten: neben dem Gitter um den Rumpf wurden jeweils zwei zylinderförmige Netze um die Propeller und Ruder generiert, vgl. Abbildung 6.

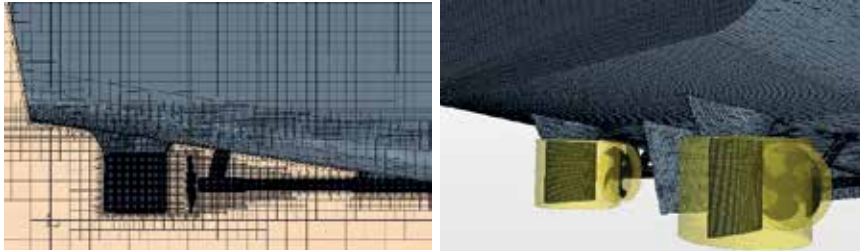


Abb. 6: Detailansichten des numerischen Gitters für den Zweischrauber.

Es wurde eine Sensitivitätsanalyse zur räumlichen Diskretisierung mit der MRF-Methode durchgeführt. Dazu wurden zwei Gitter erzeugt: ein grobes mit  $2,8 \times 10^6$  Kontrollvolumina (KV) und ein feines mit  $6,3 \times 10^6$  KV. Die Untersuchung des Einflusses der Gitterauflösung erfolgte durch Simulationen eines Z10/10-Versuchs in beiden Maßstäben. Die vorhergesagten Überschwingwinkel zeigten lediglich eine geringe Sensitivität bzgl. der räumlichen Auflösung.

Zur Untersuchung der Sensitivität der zeitlichen Diskretisierung wurden zwei Zeitschrittweiten so gewählt, dass die Propellerrotation der SI-Methode fünf bzw. zehn Grad pro Zeitschritt betrug. Der Unterschied in den Überschwingwinkeln lag unter 1 %.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Methode zur Berücksichtigung der Maschinendynamik entwickelt, welche auf dem Maschinenkennfeld basiert. Basierend auf der aktuellen vom Propulsor angeforderten Leistung und der von der Maschine bei dieser Drehzahl lieferbaren Leistung wird der Drallsatz gelöst, was ggf. zu einer Änderung der Drehzahl führt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, das Verhalten der Verbrennungsmaschinen zu imitieren, ohne signifikante Anforderungen an die Rechenleistung.

## 6. Manövrierprognose basierend auf virtuellen gefesselten Versuchen

Die Berechnung der gefesselten Manövierversuche wurde mit der Open Source Toolbox OpenFOAM durchgeführt. Um dies zu ermöglichen, wurden verschiedene Anpassungen vorgenommen. So wurde beispielsweise der Solver um die Berücksichtigung von Inertialkräften ergänzt, da sich die Simulationen auf ein hybrides Koordinatensystem beziehen, welches zwar Tauchen, Stampfen und Rollen nicht mitmacht, ansonsten aber mitbewegt wird.

Die dynamischen virtuellen Versuche werden durch die Verwendung von zeitabhängigen Randbedingungen ermöglicht, wobei am Einströmrand die Geschwindigkeiten entsprechend der vorgegebenen Schiffsbewegung definiert werden. Die Vorgehensweise bei virtuellen gefesselten Manövierversuchen ist von (Cura Hochbaum, 2006) dargestellt und eine hierauf basierende Manövierprognose ohne freie Oberfläche ist erfolgreich von (Cura Hochbaum, et al., 2008) umgesetzt worden.

Aus den Mittelwerten der simulierten stationären Versuche sowie den Zeitreihen der dynamischen Versuche werden in gleicher Form wie aus den realen Versuchen im Schlepptank mit einem CPMC die hydrodynamischen Manövierkoeffizienten abgeleitet. Unter Verwendung dieser Koeffizienten werden die Bewegungsgleichungen des manövrierenden Schiffes über die Zeit integriert. Beispielhafte Ergebnisse dieser Manövierprognosen sind in Kapitel 7 dargestellt.

Zur Bestimmung der Strömung um das Schiff werden die inkompressiblen RANS-Gleichungen numerisch mit der Finite-Volumen-Methode gelöst. Die Turbulenz wird mit dem k- $\omega$ -SST Turbulenzmodell von (Menter & Esch, 2001) unter Verwendung von Wandfunktionen modelliert. Die freie Wasseroberfläche wird mit der Volume-of-Fluid-Methode (VoF) bestimmt. Die Berechnungsgitter wurden mit dem kommerziellen Gittererzeuger HEXPRESS erstellt. Geometrische Details wie die Wellenböcke beim Zweischraubenschiff wurden ebenso berücksichtigt wie die Spalten zwischen Ruderblatt und Headbox bzw. Ruderhorn.

Im Projekt wurde ein neues Volumenkraftmodell für die Approximation der Propellerwirkung während eines virtuellen Manövierversuchs entwickelt. Mit diesem wird die Verteilung der Propellerkräfte in den Zellen der Propellerregion in Abhängigkeit des aktuellen Nachstroms aus einer Datenbank bestimmt. Die Datenbank wird vorab mit Informationen gefüllt. Hierfür werden RANS-Berechnungen mit OpenFOAM für den homogen angeströmten drehenden Propeller für eine Reihe von Fortschrittsgraden und Anströmwinden von (Yao, 2015) durchgeführt. Für jeden berechneten Fall wird anschließend die resultierende Spannungsverteilung auf der Propelleroberfläche für jede Flügelstellung auf die Zellen eines Polarrasters übertragen und anschließend als über eine Umdrehung zeitlich gemittelte Kraftkomponenten pro Flächeneinheit gespeichert.

Das implementierte Volumenkraftmodell ist gut geeignet, die mittlere Propellerwirkung zu approximieren. Für die Geradeausfahrt weicht der Schub im Vergleich zu den Messungen für beide Schiffe um maximal 0,8% ab. Die Variation des Schubes und Drehmoments bei großer Schräganströmung wird zum Teil leicht unterschätzt.



Zur Validierung der RANS-Berechnungen des drehenden Propellers wurden im Umlauf- und Kavitationstank K27 der TU Berlin Querkraftmessungen an den Propellern des Einschraubers und Zweischaubers in schräger Anströmung durchgeführt. Basis der Messtechnik ist ein Propellerdynamometer, bei dem die Propellerwelle durch ein spezielles Messglied getauscht wird, das die Messung von Propellerquerkräften ermöglicht (Lassen, 1989). Das Dynamometer hat eine Schwenkeinrichtung, die es ermöglicht, die Neigung der Propellerwelle im Bereich von  $\pm 12,5^\circ$  zu verstellen. Im Rahmen des Projektes wurde der Aufbau dahingehend modifiziert, dass eine Verstellung der Propellerwelle von  $0^\circ$  bis  $25^\circ$  erreicht werden kann. Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den RANS-Berechnungen in den Werten von Schub ( $K_T$ ), Drehmoment ( $K_Q$ ) und vertikaler Seitenkraftkomponente ( $K_F$ ), siehe Abbildung 8.



Abb. 7: Propeller des Einschraubers (links) und des Zweischaubers (rechts) bei Anströmwinkel  $\alpha=25^\circ$  und Fortschrittgrad  $J=0,6$

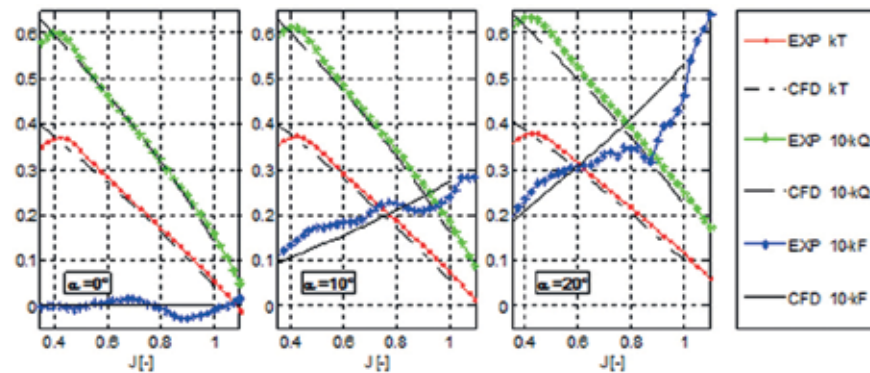


Abb. 8: Diagramme der Freifahrtversuche des Einschraubers (Propellerdaten siehe Tab. 1) für Anströmwinkel  $\alpha=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ .

Für beide Schiffe wurden alle für die Manövrierprognose erforderlichen Versuche für die Reynoldszahl des Modells mit dem Selbstpropulsionspunkt des Modells ( $MO, n_{MSPP}$ ) und der Großausführung ( $MO, n_{SSPP}$ ) sowie für die Reynoldszahl der Großausführung mit dem Selbstpropulsionspunkt der

Großausführung ( $GA, n_{SSPP}$ ) zunächst ohne Berücksichtigung der FO berechnet. Zusätzlich wurden für beide Schiffe ausgewählte Versuche auch mit FO wiederholt. Die Übereinstimmung der hydrodynamischen Kräfte und Momente aus Berechnung und Modellversuch ist insgesamt gut bis sehr gut. Effekte aus der unterschiedlichen Wahl des Propulsionspunktes sind zwischen Modellversuch und Berechnung im Einklang. In Abbildung 9 sind für beide Schiffe die Verläufe aus Berechnung und Messung über eine Periode eines dynamischen reinen Gierversuchs dargestellt.

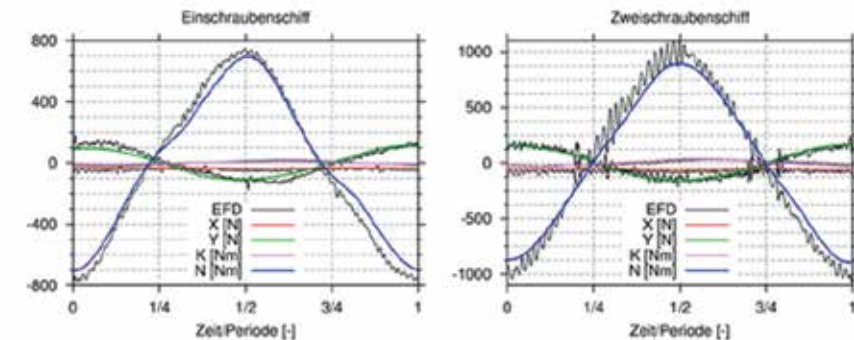


Abb. 9: Vergleich der Kraft- und Momentenverläufe einer Bewegungsperiode beim dynamischen Gierversuch (pure yaw test).

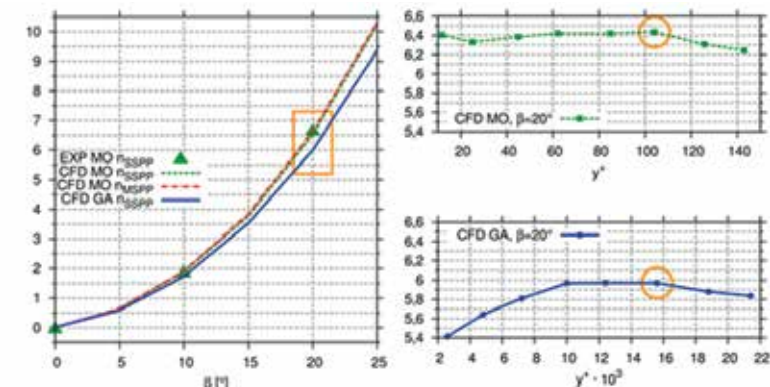


Abb. 10: Dimensionslose Seitenkraft bei stationärem Driften des Einschraubenschiffes.

Die Berechnungen für die Großausführung wurden unter Verwendung der Gitter für den Modellmaßstab durchgeführt. Eine Vorabuntersuchung zum Einfluss des dimensionslosen Wandabstandes  $y^+$  auf die Umströmung einer ebenen Platte sowie des driftenden Einschraubenschiffes ergab, dass bei Verwendung von Wandfunktionen die gleichen Gitter für die Reynoldszahl des Modells und der Großausführung verwendet werden können. In Abbildung 10 ist für das Einschraubenschiff die dimensionslose Seitenkraft

$10^3 Y'$  für stationäres Driften dargestellt. Während in diesem Fall der Einfluss des Propulsionspunktes des Modells auf die Seitenkraft marginal ist, ergeben sich für die Reynoldszahl der Großausführung mit größer werdendem Driftwinkel zunehmend kleinere Seitenkräfte gegenüber der Berechnung im Modellmaßstab. Auf der rechten Seite ist für den Driftwinkel  $\beta=20^\circ$  die Sensitivität von  $Y'$  auf den dimensionslosen Wandabstand  $y^+$  dargestellt. Die Verwendung von  $y^+\approx 100$  für den Modellmaßstab, in der Großausführung entspricht dies  $y^+\approx 16.000$ , ist eine geeignete Wahl.

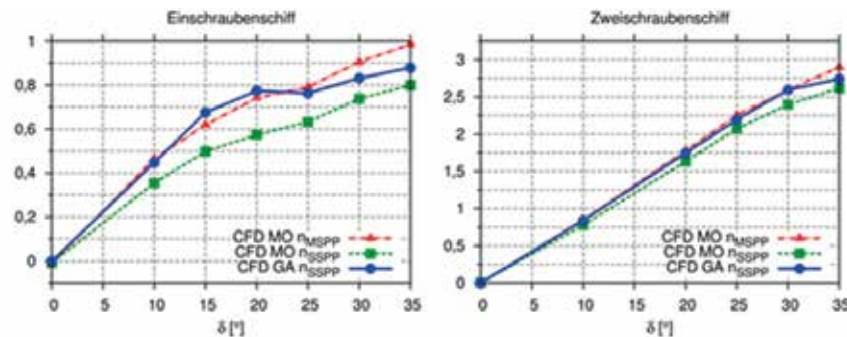


Abb. 11: Dimensionslose Seitenkraft bei Geradeausfahrt mit gelegtem Ruder für das Ein- und Zweischraubenschiff.

Abb. 11 zeigt für beide Schiffe die dimensionslose Seitenkraft auf das Gesamtsystem infolge gelegten Ruders bei Geradeausfahrt. Für beide Schiffe gelten die gleichen Zusammenhänge: Die Gesamtseitenkraft ist für  $MO, n_{MSP}$  höher als für  $MO, n_{SSPP}$  und der Kraftverlauf für  $GA, n_{SSPP}$  gleicht insgesamt mehr demjenigen von  $MO, n_{MSP}$  als von  $MO, n_{SSPP}$ . Für das Einschraubenschiff wird die klassische Annahme, die beiden eingangs genannten Maßstabseffekte würden sich ausgleichen, bestätigt. Dies zeigt sich wider Erwarten auch beim Zweischraubenschiff, allerdings ist hier der Einfluss des Propulsionspunktes deutlich kleiner. Der erwähnte kleine Maßstab dieses Modells dürfte diesen Effekt zumindest teilweise erklären.

### Vergleich der Ergebnisse der Manövrierverfahren

Im Folgenden werden die Ergebnisse der direkten Manövriersimulationen dargestellt. Abb. 12 (links) zeigt den berechneten und gemessenen Gierwinkel  $\psi$ , Ruderwinkel  $\delta$  sowie die Schiffslängsgeschwindigkeit  $U$  für den Zweischrauber im Modellmaßstab bei einem Z10/10-Versuch. In den Modellversuchen ohne Reibungsabzug beträgt der erste Überschwingwinkel  $5,9^\circ$  und die Anschwenkzeit  $7,4$  s. Die Ergebnisse der SI-Simulation unterschätzen den Überschwingwinkel um  $1^\circ$ , die Anschwenkzeit unterscheidet sich lediglich um  $0,1$  s. Da die Schiffsbewegungen während des Z10/10 Versuchs ge-

ring sind, ist deren Vorhersage mittels numerischer Simulation schwierig. Für den Z35/10 Versuch konnten sehr gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der Modellversuche erzielt werden.

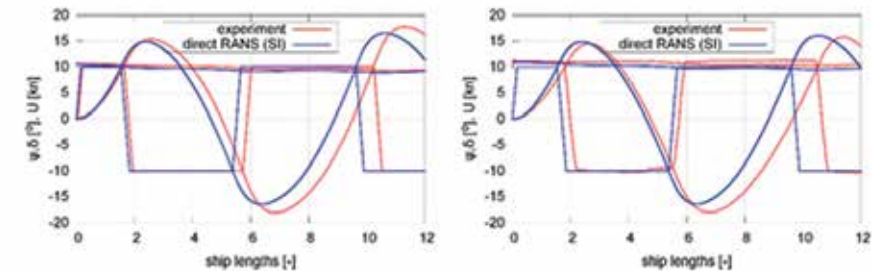


Abb. 12: Gemessene und berechnete Z10/10-Versuch im Modellmaßstab (links) und Großausführung (rechts) für den Zweischrauber.

Ähnliche Aussagen können für die Simulationen im Großausführungsmaßstab getroffen werden. In Abb. 12 (rechts) sind die berechneten und gemessenen Verläufe des Gierwinkels, des Ruderwinkels und der Schiffsgeschwindigkeit während eines Z10/10 Versuchs des Zweischraubers dargestellt. Der erste Überschwingwinkel stimmt gut überein:  $4,5^\circ$  gemessen und  $4,8^\circ$  berechnet. Größere Differenzen zeigen sich beim zweiten Überschwingwinkel,  $8^\circ$  gemessen gegenüber  $6,5^\circ$  berechnet, sowie der Anschwenkzeit:  $30,5$  s im Versuch und  $24$  s in der Simulation.

Einige Faktoren erschweren den Vergleich zwischen Großausführungsmessungen und Simulationen. Da die Strömung über Grund gewöhnlich nicht bekannt ist, konnte sie in der numerischen Simulationen nicht berücksichtigt werden. Der Einfluss von Wind und der Maschinendynamik wurde in den gezeigten Simulationen ebenfalls nicht berücksichtigt.

Am Beispiel eines Z10/10-Versuchs und eines Drehkreises mit Ruderwinkel  $10^\circ$  wurden Maßstabseffekte für den Zweischrauber mittels Simulationen untersucht. Die SI-Methode wurde zur Beschreibung der Propellerrotation in den RANS-Simulationen für beide Maßstäbe eingesetzt. Der Vergleich des Z10/10-Versuchs zeigt leicht geringere Überschwingwinkel bei der Simulation im Großausführungsmaßstab, vgl. Abb. 13 (links). Ein entgegengesetzter Trend zeigt sich bei den Simulationen des Drehkreises. Sowohl Quer- (transfer) und Längsversatz (advance) als auch der taktische Durchmesser sind bei Simulation im Großausführungsmaßstab geringfügig größer, siehe Abb. 13 (rechts). Um eine eindeutige Aussage hinsichtlich der vorhergesagten Maßstabseffekte durch direkte numerische Manövriersimulationen zu treffen, sind weitere Untersuchungen notwendig.

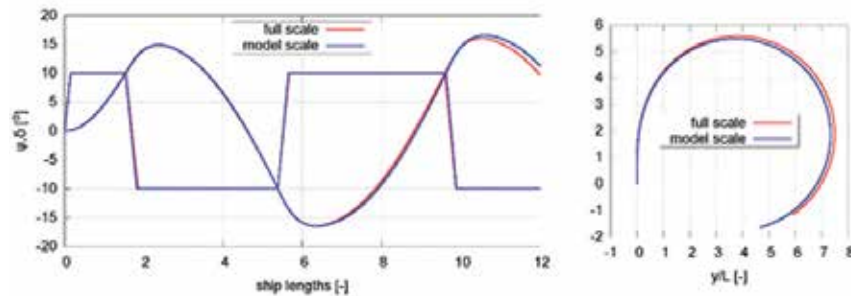


Abb. 13: Direkte Simulation des Z10/10-Versuchs (links) und Drehkreis-Versuchs mit  $\delta=-10^\circ$  (rechts) im Modell- und Großausführungsmaßstab für den Zweischrauber.

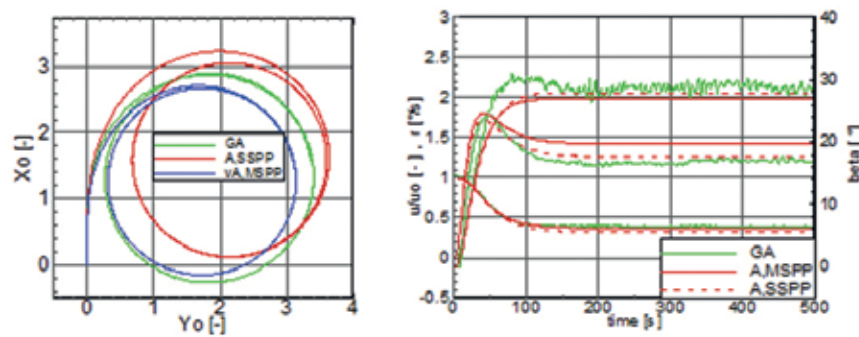


Abb. 14: Bahnkurven des Einschraubers (links) und Zeitverläufe von  $u/u_0$ ,  $r$  und  $\beta$  des Zweischraubers (rechts) im Drehkreisversuch mit  $\delta=-35^\circ$ .

Die mit Hilfe der realen und virtuellen gefesselten Versuche gewonnenen Koeffizienten wurden zur Vorhersage von Rudermanövern beider Schiffe herangezogen. Abb. 14 (links) zeigt für das Einschraubenschiß die Bahnkurve während eines Drehkreises mit einem Ruderwinkel von  $\delta=-35^\circ$ . Neben dem Ergebnis der Großausführungsmessung sind die Prognosen basierend auf den realen gefesselten Modellversuchen mit  $n_{SSPP}$  (A,SSPP) und den virtuellen gefesselten Modellversuchen mit  $n_{MSPP}$  (vA,MSPP) dargestellt. Beide Prognoseergebnisse stimmen gut mit der Großausführungsmessung überein. Die Vorhersage auf Basis der virtuellen Versuche unterschätzt den taktischen Durchmesser um 8,5 %.

In Abb. 14 (rechts) sind die Zeitreihen der Längsgeschwindigkeit  $u/u_0$ , der Gierrate  $r$  und des Driftwinkels  $\beta$  für einen Drehkreis des Zweischraubenschißes mit einem Ruderwinkel von  $\delta=-35^\circ$  dargestellt. Während für die stationäre Phase die Längsgeschwindigkeit  $u/u_0$  und der Driftwinkel  $\beta$  aus der Prognose basierend auf den gefesselten Modellversuchen für beide Propulsionspunkte nur geringe Unterschiede zeigen und gut mit den Verläufen der Großausführungsmessung übereinstimmen, stimmt die Gierrate  $r$  basierend

auf dem Selbstpropulsionspunkt der Großausführung  $n_{SSPP}$  wie erwartet besser mit der Großausführungsmessung überein.

In Abb. 15 (links) werden für das Einschraubenschiß die Prognosen eines Z10/10-Versuchs basierend auf den virtuellen gefesselten Modellversuchen (vA,MSPP) und die Ergebnisse einer Großausführungsmessung (GA) gegenübergestellt. Die Übereinstimmung der Überschwingwinkel ist sehr zufriedenstellend. Der Unterschied der Zeitverläufe lässt sich vermutlich durch die nicht-automatisierte Manöverdurchführung in der Großausführungsmessung erklären.

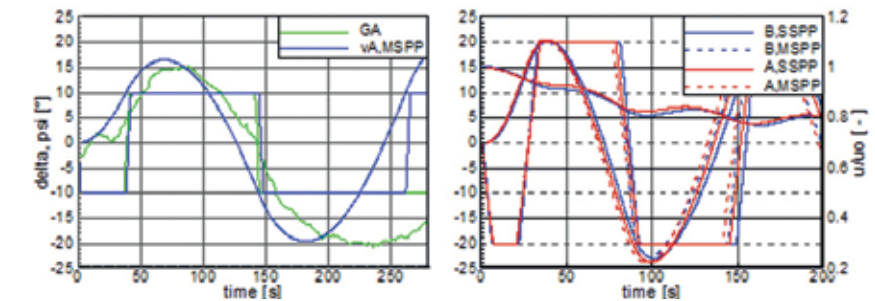


Abb. 15: Z10/10-Versuch des Einschraubenschißes (links) und Z20/10-Versuch des Zweischraubenschißes (rechts).

Abb. 15 zeigt für das Zweischraubenschiß einen Z20/10-Versuch. Gegenübergestellt werden die Prognose basierend auf den gefesselten Modellversuchen (A,\*) und die Ergebnisse der Versuche mit dem frei manövrierenden Modell (B,\*) für beide Propulsionspunkte  $n_{MSPP}$  und  $n_{SSPP}$ . Die Übereinstimmung beider Prognosemethoden hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs des Kurswinkels  $\psi$  und des Geschwindigkeitsverlaufs  $u/u_0$  ist sehr gut. Die Effekte des unterschiedlichen Propulsionspunktes sind zwischen beiden Prognosemethoden im Einklang. Die geringere Propellerdrehzahl  $n_{SSPP}$  hat auf die Überschwingwinkel keinen signifikanten Einfluss sondern äußert sich lediglich in einem zeitlichen Versatz.

## Schlusswort

Das Forschungsvorhaben PREMAN hat die grundsätzliche Tauglichkeit der angewandten numerischen Techniken für die Prognose der Manöviereigenschaften von Schiffen bestätigt. Die virtuellen Prognoseverfahren wurden durch die Implementierung des neuen Volumenkraftmodells zur Approximation der Propellerkräfte verbessert. Effekte der Schräganströmung des Propellers werden hierdurch besser erfasst. Die numerische Simulation der Versuche für den Großausführungsmaßstab wurde erfolgreich eingeführt. Durch



die direkte numerische Manöversimulation frei fahrender Versuche ergibt sich ein großes Potential für die Manövriervorhersage. Hierfür wären weitere Forschungsaktivitäten zu begrüßen.

An der HSVA steht eine neue, weltweit einzigartige Versuchstechnik zur Verfügung, die es ermöglicht, während frei fahrender Manövrierversuche mit dem CPMC den Propulsionspunkt des Modells beliebig zu wählen und darüber hinaus die Maschinencharakteristik des betrachteten Schiffes zu berücksichtigen. Dies wird die ohnehin hohe Qualität der Vorhersage auf der Basis von Modellversuchen weiter verbessern.

Die durchgeführten Messfahrten mit den Großausführungen der Testschiffe lieferten wertvolle und umfangreiche Daten für die Beurteilung von Maßstabeffekten. Sie stehen für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

Für beide untersuchten Schiffe halten sich die Maßstabeffekte in Grenzen. Die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Effekte entspricht den Erwartungen. Im Fall des Zweischraubers, für den die größten Gesamteffekte erwartet wurden, musste wegen seiner geringen Schiffsänge bei der Herstellung des Modells ein kleiner Maßstab gewählt werden. Vermutlich fallen daher auch in diesem Fall die Maßstabeffekte so gering aus.

## Danksagung

Die Projektpartner bedanken sich beim BMWi für die Bereitstellung der Fördermittel und beim Projektträger Jülich, für die fachliche und organisatorische Betreuung. Des Weiteren gilt ein außerordentlicher Dank den beiden Reedereien HARREN UND PARTNER und HAPAG LLOYD für die großzügige Bereitstellung der Schiffe für die Großausführungsmessungen.

## Literatur

- [1] Cura Hochbaum, A., 2006. Virtual PMM Tests for Manoeuvring Prediction. Rome, 26th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics.
- [2] Cura Hochbaum, A., Vogt, M. & Gatchell, S., 2008. Manoeuvring Prediction for Two Tankers Based on RANS Simulations. Copenhagen, SIMMAN 2008.
- [3] el Moctar, O., Oberhagemann, J. & Schellin, T., 2012. Free-Surface RANS for Hull Girder Whipping and Springing. Houston, Transactions of the the Society of Naval Architects & Marine Engineers, pp. pp. 48-66.

- [4] Lassen, D., 1989. Zum Entwurf schrägangeströmter Propeller (Dissertation). Berlin: TU Berlin.
- [5] Menter, F. & Esch, T., 2001. Elements of Industrial Heat Transfer Prediction. Uberlandia, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM).
- [6] Yakhot, V., Orszag, S., Thangam, S. & Gatski, T., 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. Physics of Fluids, Band Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520.
- [7] Yao, J., 2015. RANS Simulations of Ship Manoeuvring Motions Based on OpanFOAM (vorläufiger Titel der Dissertation). Berlin: TU Berlin.

## **moVer – Entwicklung eines modularen Verfahrens zur umfassenden Bestimmung des Bewegungsverhaltens von Schiffen in Richtungsseegängen**

Förderkennzeichen: 03SX338A

Dr. Katja Jacobsen, HSVA – Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt

### **Einleitung**

Nach wie vor sind Seegangsversuche ein unverzichtbares Werkzeug, um sowohl seegehende Schiffe als auch Offshorestrukturen hinsichtlich Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Einsetzbarkeit im Seegang zu untersuchen. Versuche sind jedoch verhältnismäßig zeitaufwendig und damit teuer. Deshalb werden in der Regel in Standardversuchen nur wenige Seegänge, Geschwindigkeiten bzw. Welleneinfallswinkel untersucht, welche nur einige wenige Situationen im Leben eines Schiffes erfassen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes moVeR wurde ein Verfahren entwickelt, welches sehr effizient das Seegangsverhalten von Schiffen bestimmt. Mit Hilfe von wenigen Versuchen kann eine umfassende Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Schiffen im Seegang ermittelt werden. Umfassend in diesem Zusammenhang bedeutet die Ermittlung des Bewegungsverhaltens in beliebigen natürlichen Seegängen und bei beliebigen Begegnungswinkeln. Dies erlaubt z. B. die effiziente Durchführung von Vergleichs- bzw. Validierungsserien während einer Optimierung von Schiffsförmungen. Das Verfahren berücksichtigt sowohl den Einfluss der Kurzkämmigkeit des Seegangs (natürlicher Seegang) als auch von Dünung auf das Bewegungsverhalten von Schiffen.

Das Verfahren basiert auf den Übertragungsfunktionen, die das lineare Systemverhalten einer Struktur im Seegang beschreiben. Sind sie bekannt, kann mittels stochastischer Analyse das Verhalten in jedem beliebigen Seegang bestimmt werden. Mit der Berücksichtigung des Einflusses der Kurzkämmigkeit des Seegangs und der Dünung ergibt sich ein leistungsfähiges, versuchstechnisch effizientes und damit wirtschaftliches Verfahren zur genauen Vorhersage der Bewegungen eines Schiffes mit Vorwärtsgeschwindigkeit in naturgetreuen Seegängen, wie Schiffe sie Tag für Tag erleben.



## Zielsetzung

Kernpunkt des Forschungsvorhabens ist der 40m lange Demonstrator des Seitenwellenerzeugers im großen Schlepptank der HSVA, der 2011 in Betrieb genommen wurde (Jacobsen, 2011). Der Seitenwellenerzeuger hängt in der Mitte des Tanks an der Tankwand. Außerhalb seiner Betriebszeiten wird er im Seitengang gelagert, um keine störenden Einflüsse auf andere Versuche zu erzeugen. Aufgrund seiner Konstruktionsweise ist die Erzeugung der gesamten Palette an denkbaren Wellensequenzen möglich: Reguläre Wellen, lang- sowie kurzkämmige irreguläre Seegänge, benutzerdefinierte Wellenzüge oder Spektren innerhalb eines Winkels von  $20^\circ$  bis  $160^\circ$ . Mit dem Seitenwellenerzeuger ist es erstmalig möglich, auch in einem Schlepptank Modelle von Schiffen mit Vorwärtsgeschwindigkeit in seitlichem bzw. schrägem Seegang zu untersuchen.

Bislang konnten an der HSVA, und im Übrigen auch an den anderen Versuchsanstalten in Deutschland, Schiffsmodelle nur im langkämmigen irregulären Seegang untersucht werden. Außerdem waren die Untersuchungen von Modellen in Fahrt aufgrund der begrenzten Tankbreite in der Regel auf Seegang direkt von vorne oder hinten beschränkt. Versuche in seitlichem Seegang waren nur bei Versuchen ohne Geschwindigkeit oder auf Zickzackkursen (mit unerwünschte Begleiterscheinungen durch die Wendemanöver) möglich. Der Seitenwellenerzeuger schafft beiden Einschränkungen Abhilfe: (1) Mit der Erzeugung von kurzkämmigem Seegang können realistische Seegangszenarien im Versuch modelliert werden; (2) Begegnungswinkel mit Schiffen in Fahrt im Seegang sowohl von der Seite als auch von schräg vorne und schräg hinten können realisiert werden.

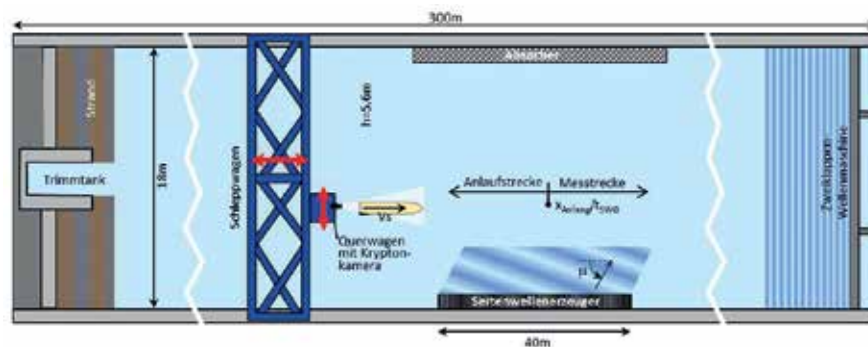


Abb. 1: Ansicht des großen Schlepptanks der HSVA mit dem neuen Seitenwellenerzeuger, dem Zweiklappenwellenerzeuger sowie Schleppwagen mit Querkamera

Etwas nachteilig ist jedoch die beschränkte Länge des Seitenwellenerzeugers mit 40m. Bei höheren Geschwindigkeiten verkürzt sich die Messzeit pro

Fahrt so sehr, dass u.U. keine sinnvollen Aussagen zum Bewegungsverhalten mehr gemacht werden können. Genau hier setzt das Forschungsvorhaben an, um zumindest für Bewegungsmessungen diesen Nachteil zu beheben. Dabei ist, im Vergleich zu den bisherigen Standardseegangversuchen, ein weiterer Vorteil von Bedeutung: Die Bestimmung des Bewegungsverhaltens erfolgt nicht nur punktuell für einige wenige Seegänge, sondern es wird eine Ausgangsbasis für die Ermittlung des Seegangverhaltens in beliebigen Seegängen bei einer Vielzahl von Begegnungswinkeln geschaffen.

Mit Hilfe der transienten Wellenpakettechnik können die Übertragungsfunktionen innerhalb kurzer Zeit mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Jedoch ist die Ermittlung der Übertragungsfunktionen mit der transienten Wellenpakettechnik nicht bei allen Begegnungswinkeln ohne weiteres möglich. Im Gegensatz zu Kursen gegen die Wellen, wo die Begegnungsfrequenz immer positiv und eindeutig ist, ergeben sich auf achterlichen Kursen Situationen, in denen zwei Wellen mit unterschiedlichen Wellenkreisfrequenzen dieselbe Begegnungsfrequenz aufweisen. Diese Uneindeutigkeit verhindert die direkte Ermittlung der Übertragungsfunktion, wie sie in auf Kursen gegen die Wellen möglich ist. Das heißt, die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen in (schräg) achterlichen Wellenpaketen stellte das zentrale Arbeitspaket in diesem Forschungsvorhaben dar (Arbeitspaket 2 in Abb. 2).



Abb. 2: Arbeitspakete in moVeR mit Ansicht des Seitenwellenerzeugers im Hintergrund

Sowohl für die Qualität der Ergebnisse, als auch die Reproduzierbarkeit der Versuche ist es unabdingbar, dass der Versuch automatisch abläuft. Das Modell muss zu einem definierbaren Zeitpunkt an einem vorzugebenden Ort mit

der gewünschten Geschwindigkeit eintreffen. Hierfür wurde in Arbeitspaket 1 das neue Steuerungs- und Antriebssystem „SAS“ entwickelt.

Nach der experimentellen Ermittlung der Übertragungsfunktionen der Schiffsbewegungen mittels transienter Wellenpakete können charakteristische Werte wie z. B. die signifikanten Amplituden der Antworten in beliebigen Seegängen anhand einer stochastischen Analyse bestimmt werden. Sie gelten für irregulären langkämmigen Seegang. In dieser Form ergeben sich die Ergebnisse aus den traditionellen Versuchen, aufgrund begrenzter Versuchszeiten allerdings nur punktuell für einige wenige Seegänge. Die Berücksichtigung des kurzkämmigen Charakters von natürlichen Seegängen wird im dritten Arbeitspaket verfolgt (Abb. 2, Arbeitspaket 3). Ebenfalls berücksichtigt werden kann bei Bedarf die Dünung, die sich einem durch Wind angefachten Seegang überlagert (Arbeitspaket 4).

### Entwicklung des Steuerungs- und Antriebssystems SAS

Ziel dieses ersten Arbeitsschrittes war es, den Ablauf von Versuchen so zu koordinieren, dass das Modell zu einem vorgegebenen Zeitpunkt an einem vorgegeben Ort auf die Welle trifft. Hierzu wurde das neue „Steuerungs- und Antriebssystem (SAS)“ entwickelt. In Abbildung 3 ist das Konzept von SAS dargestellt. Es handelt sich dabei um ein recht komplexes System: Neben der Steuerung des Modells durch den Tank mit einem Autopiloten können bis zu acht Fahrmotoren, acht Rudermaschinen und vier Flossenantriebe gesteuert werden. Weiterhin ist in SAS der Betrieb und die Regelung von Antirolltanks möglich. Für die Regelung der Flossen und Antirolltanks können sowohl interne als auch externe Regelalgorithmen berücksichtigt werden. Im vollautomatischen Modus folgen Schlepp- und Querwagen dem Modell in Längs- und Querrichtung.

Folgende Hauptversuchsarten ermöglicht das neue Steuerungs- und Antriebssystem:

- Handsteuerung des Modells (Kurs und Drehzahl).
- Steuerung mit Autopiloten anhand von den erfassten Messwerten.
- Vollautomatisch, d.h. der komplette Versuch wird auf einen Knopfdruck hin gestartet. Schlepp- und Querwagen folgen dabei dem Modell automatisch durch den Tank. Der Autopilot kann das Modell sowohl kurs- als auch positionsgeregt durch den Tank fahren.

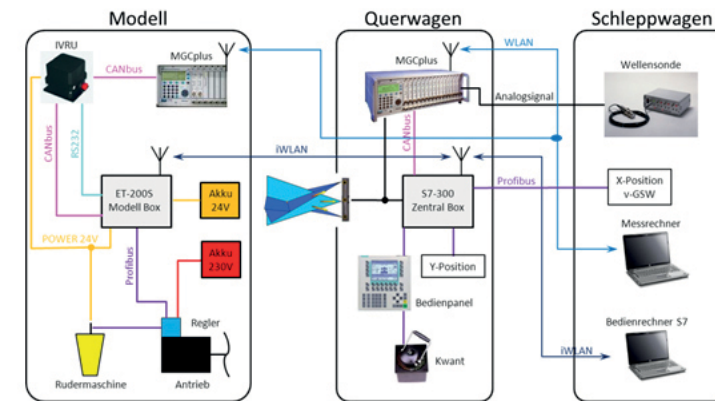


Abb. 3: Schematische Darstellung der Zusammenhänge und benötigten Komponenten von Modell, Querwagen und Schleppwagen für einen automatisierten Versuchsablauf

Für die Erfassung der Bewegungen des Modells stehen der Kreisel (Messung von Beschleunigungen, Drehraten und Winkel) sowie Krypton, ein optisches Bahnverfolgungssystem zur Verfügung. Für die Vollautomatikstufe mit nachgeführtem Quer- und Schleppwagen ist Krypton notwendig, da die aus dem Kreisel abgeleiteten Horizontalbewegungen zu ungenau sind.

In Abbildung 4 ist auf der linken Seite der Startbildschirm von SAS zu sehen. Dies ist der Hauptbildschirm, um die Versuche zu fahren. Modellantriebe können ein-/ausgeschaltet, die Betriebsart gewählt sowie die Fahrtrichtung definiert werden. Für den Versuch können drei verschiedene Drehzahlen vorgegeben werden. Auch der Betrieb der Flossen kann in diesem Bildschirm angewählt werden. Im Weiteren werden hier Schlepp- und Querwagen in den Nachführmodus gesetzt. Im blauen Feld im Startbildschirm sind alle relevanten Werte für die Automatik angegeben. Im Vollautomatikmodus muss man dann lediglich, um den Versuch zu starten, die Schaltfläche „Automatik Start“ drücken. Nach Ablauf der jeweiligen Wartezeiten fährt das Modell los, bzw. der Wellenerzeuger startet mit der Erzeugung von Wellen.



Abb. 4: Startbild (links) sowie Automatikbild (rechts) von SAS

Der Bildschirm für die Eingabe aller relevanten Werte für den Automatikmodus ist in Abbildung 4 – rechts zu sehen. Zunächst ist der Anfang der Messstrecke sowie Geschwindigkeit, Drehzahl und Dauer für die Anlaufstrecke anzugeben. Danach sind die Laufzeiten für die beiden Wellenerzeuger einzutragen und die Drehzahl für die eigentliche Versuchsstrecke auszuwählen (eine der drei Drehzahlen, die im Startbild angegeben werden). Bei „geregeltem“ Anlauf regelt die SAS die Propellerdrehzahl bis zum Beginn der Messstrecke so, dass das Modell mit der vorgegebenen Geschwindigkeit den definierten Ort ( $x_{\text{Anfang}}$ ) zur vorgegebenen Zeit  $t_{\text{SWG}}$  (Laufzeit der Welle) erreicht (zur Veranschaulichung siehe auch Abbildung 1). Die mit diesen Vorgaben berechneten Wartezeiten für die beiden Wellenerzeuger und das Modell werden an den Startbildschirm übergeben und der Versuch kann gestartet werden.

In allen weiteren Fenstern (nicht dargestellt) werden weitere notwendige Eingaben für die Regelung der Ruder, Propeller, Flossen, Autopiloten etc. gemacht.

Das Steuerungs- und Antriebssystem SAS ist zwar für das Projekt moVer maßgeschneidert worden, wird aber mittlerweile bei den meisten Seegangversuchen in der HSVA eingesetzt. Insbesondere die Steuerung des Modells mit einem Autopiloten verbessert deutlich die Qualität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse, da z.B. die manuelle Steuerung abhängig vom Steuermann unterschiedlich große Einflüsse auf die Bewegungen des Modells erzeugt hatte. Außerdem sind mit SAS Versuche vollständig reproduzierbar, was z. B. wichtig ist wenn zwei verschiedene Modelle zu vergleichen sind.

### Übertragungsfunktionen in (schräg) achterlichen Wellenpaketen

Übertragungsfunktionen widerspiegeln das Seegangverhalten von Schiffen in regelmäßigen Wellen mit Einheitsamplitude. Damit stellen die Übertragungsfunktionen sozusagen die Visitenkarte eines Schiffes im Seegang dar. So ist zum Beispiel ein direkter Vergleich sowie Bewertung des Bewegungsverhaltens von verschiedenen Schiffen mittels ihrer Übertragungsfunktionen möglich. Und mit Hilfe der Übertragungsfunktionen kann auch das Bewegungsverhalten von Schiffen im natürlichen (irregulären) Seegang mittels stochastischer Analyse ermittelt werden.

Für die Ermittlung der Übertragungsfunktion von Schiffen im Seegang kommt die Wellenpakettechnik zum Einsatz. Aufgrund ihrer Dispersionseigenschaft verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen mit der Frequenz. Die Geschwindigkeit nimmt mit grösser werdender Periode, also mit kleiner werdender Frequenz, zu. So überholt also eine lange Welle eine zu

einem früheren Zeitpunkt erzeugte kurze Welle. Auf dieser Eigenschaft beruht die Wellenpakettechnik.

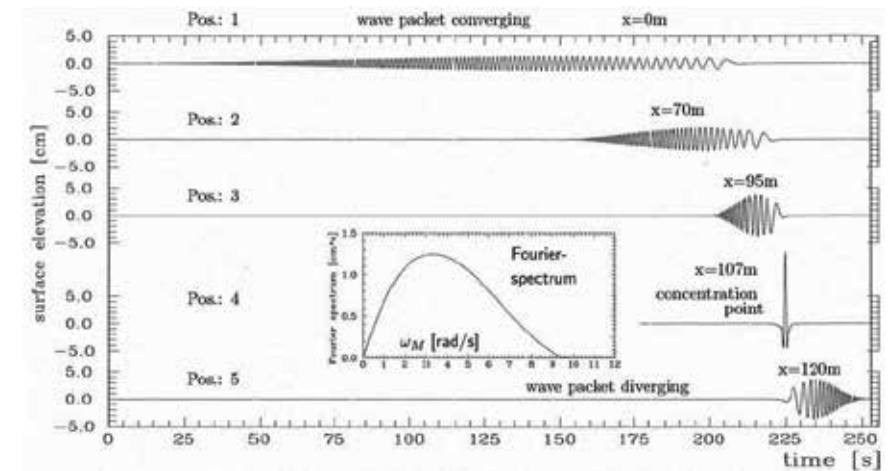


Abb. 5: Zeitschriebe eines Wellenpaketes an verschiedenen Orten mit Konzentrationspunkt bei  $x_K=107\text{m}$  (Kühnlein, 1997)

In einem Wellenpaket werden Wellen von zunehmender Wellenlänge erzeugt. Dies ist in Abbildung 5 im obersten Zeitschrieb dargestellt, wo das Wellenpaket für  $x=0\text{m}$  (d.h. an der Wellenklappe), dargestellt ist. Es sind zunächst die kurzen (hochfrequenten) Wellen zu sehen. Die Wellenlänge nimmt in jedem Zeitschritt zu. Während der Laufzeit des Wellenpaketes durch den Tank holen nun die längeren Wellen die kürzeren Wellen ein, so dass die Ausdehnung des Wellenpaketes kontinuierlich kleiner wird, siehe Positionen  $x=70\text{m}$  und  $x=95\text{m}$ . Dies währt so lange, bis sich alle Wellen in einem Punkt, dem Konzentrationspunkt  $x_K$  ( $x=107\text{m}$ , Abbildung 5) überlagern. Von dem Wellenpaket ist nur noch eine einzige hohe Welle zu sehen. Nach dem Konzentrationspunkt läuft das Wellenpaket wieder auseinander, da die langen Wellen nun vorneweg laufen. Details zur Beschreibung von Wellenpaketen können z. B. in Kühnlein 1997 nachgelesen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass das Fourierspektrum des Wellenpaketes invariant in Zeit ist, kann der Treffpunkt mit dem Modell zu jedem beliebigen Zeitpunkt stattfinden, ohne dass es Informationsverluste gibt. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass das Wellenpaket nicht bricht. Vorzugsweise finden die Versuche kurz vor dem Konzentrationspunkt statt, da damit die Versuchsdauer kurz wird und die Reflektionen an den Tankwänden nicht zurück in die Messung laufen.

Wird ein Modell einem Wellenpaket ausgesetzt, ergibt sich die Antwort des Modells als Reaktion auf jede einzelne erregende Wellenkomponente. Durch



Fouriertransformation des gemessenen Antwortsignals erhält man das Fourierspektrum. Die Division dieses Antwortspektrums  $F_{\text{Antwort}}(\omega)$  durch das Fourierspektrum des Wellenzuges  $F_{\text{WP}}(\omega)$ , führt schließlich zur komplexen Übertragungsfunktion:

$$H(\omega) = \frac{F_{\text{Antwort}}(\omega)}{F_{\text{WP}}(\omega)} \quad (1)$$

Dabei bedeutet komplexe Übertragungsfunktion, dass sowohl der Betrag als auch die Phase der Antwort ermittelt werden.

Wie eingangs erwähnt, stellt die Ermittlung der Übertragungsfunktionen in achterlichen bzw. schräg achterlichen Wellen das Kernstück des Forschungsvorhabens dar, da es in achterlichen Wellenpaketen unweigerlich zu der Situation kommt, dass das Modell entweder nur von den langen Wellenkomponenten überholt wird, oder nur die kürzeren einzuholen vermag. Das Stichwort hier ist die Begegnungsfrequenz, welche eine Funktion der Wellenkreisfrequenz  $\omega_0$ , der Geschwindigkeit  $V_s$  und des Welleneinfallswinkels  $\mu$  ist:

$$\omega_e = \omega_0 - \omega_0^2 V_s / g \cos \mu \quad (2)$$

In Abbildung 6 ist der Zusammenhang von Wellenkreisfrequenz und Begegnungsfrequenz für eine Schiffsgeschwindigkeit von 14kts und einem Welleneinfallswinkel von  $15^\circ$  (schräg von hinten) in Verbindung mit der Übertragungsfunktion dargestellt. Im linken Bild sind Begegnungsfrequenz (grün Linie) und Übertragungsfunktion (rot) über der Wellenkreisfrequenz dargestellt. Für die Wellenkreisfrequenz  $\omega_0 = 0.705 \text{ rad/s}$  ist die Begegnungsfrequenz maximal ( $\omega_{e, \text{max}} = 0.353 \text{ rad/s}$ ). Diese Wellenkreisfrequenz, bei der die Begegnungsfrequenz maximal ist, wird im Folgenden als Scheitelpunkt bezeichnet. Bei  $\omega_0 = 1.41 \text{ rad/s}$  ist die Begegnungsfrequenz Null, Schiff und Welle haben also die gleiche Geschwindigkeit. Wellen mit Kreisfrequenzen die kleiner sind, überholen das Schiff, während Wellen mit größerer Frequenz von dem Schiff überholt werden.

Im rechten Teil von Abbildung 6 ist die Übertragungsfunktion stattdessen als Funktion der Begegnungsfrequenz sowie die Wellenkreisfrequenz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es für eine einzige Begegnungsfrequenz bis zu drei Lösungen für die Wellenkreisfrequenz und damit auch für die Übertragungsfunktion geben kann. Zwei sind offensichtlich, nämlich die für Bereich I und II. Doch auch der Bereich III erzeugt eine weitere Lösung, da negative

Frequenzen nicht möglich sind und diese somit an der Achse  $\omega_e = 0$  gespiegelt werden.

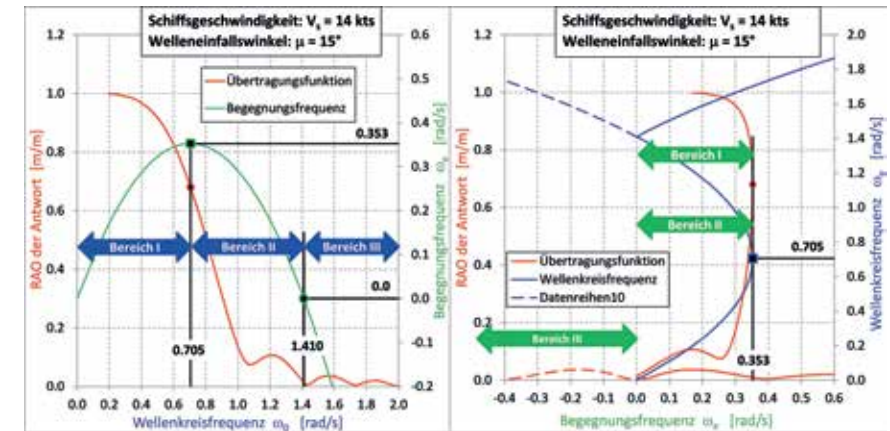


Abb. 6: Darstellung einer Übertragungsfunktion über der Wellenkreisfrequenz  $\omega_0$  (links) sowie über der Begegnungsfrequenz  $\omega_e$

Das heißt, selbst wenn es möglich wäre, das gesamte Wellenpaket in einem einzigen Versuch zu erfassen, indem man das Modell direkt im Konzentrationspunkt testet, wäre doch das Ergebnis unbrauchbar, da für jede Begegnungsfrequenz Anteile der Übertragungsfunktion von drei verschiedenen Wellenkreisfrequenzen enthalten wäre.

Das bedeutet, dass abhängig von der Versuchsbedingung (Geschwindigkeit und Welleneinfallswinkel) bis zu drei Versuche durchgeführt werden müssen, um die Übertragungsfunktion korrekt zu erfassen. In der Praxis stellt es sich aber glücklicherweise so dar, dass sich der relevante Frequenzbereich, in dem Schiffsbewegungen auftreten, in der Regel durch höchstens zwei Bereiche erfassen lässt. Es empfiehlt sich daher, vor dem Versuch sorgfältig zu prüfen, welche Bereiche getestet werden müssen. Dies muss selbstverständlich in Verbindung mit dem für das Schiff relevanten Frequenzbereich abgestimmt werden. Es macht keinen Sinn, für ein z.B. sehr großes Schiff Versuche in sehr kurzen Wellen durchzuführen, bei denen das Schiff keine Bewegungen ausführt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7 (links) dargestellt: Für Tauchen, Rollen und Stampfen sind die für das Schiff interessanten Frequenzbereiche farblich markiert. Diese sind anhand der Schiffslänge und der Rolleigenperiode abgeschätzt worden. Weiterhin ist der Leistungs-

bereich des Wellenerzeugers (umgerechnet auf die Großausführung) sowie der Verlauf der Begegnungsfrequenz angezeigt am Beispiel einer Schiffsgeschwindigkeit von  $V_s=14\text{ kts}$  und einem Welleneinfallswinkel von  $\mu=60^\circ$ . Auch aus dieser Ansicht ist sofort ersichtlich, dass für die Ermittlung dieser Übertragungsfunktion zwei Versuchsfahrten notwendig sind: die erste in einem Wellenpaket mit einem Frequenzbereich von  $0.16\text{ rad/s}$  bis  $1.36\text{ rad/s}$  und die zweite in einem Wellenpaket von  $1.36\text{ rad/s}$  bis  $1.74\text{ rad/s}$ .

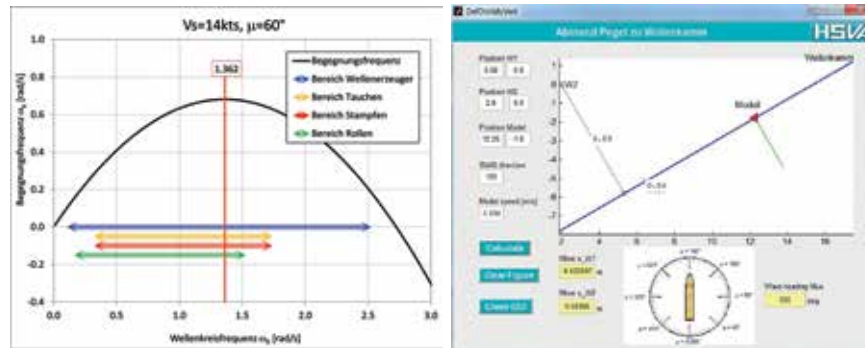


Abb. 7: Darstellung der für die Schiffsbewegungen relevanten Frequenzbereiche (links) sowie Bestimmung der Pegelpositionen zum Wellenkamm (rechts)

In Abbildung 7 ist ein weiteres Hilfsmittel dargestellt, womit die Abstände von Wellensonden (W1, W2) zum Wellenkamm, der durch den Hauptspant geht, berechnet werden. Die Wellensonden sind am Schleppwagen befestigt, und bewegen sich damit also mit der Schleppwagengeschwindigkeit, die wiederum der Modellgeschwindigkeit entspricht. Es hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse umso besser werden, je weniger der gemessene Wellenzug verschoben werden muss. Die ermittelten Beträge der Übertragungsfunktion sind verhältnismäßig unempfindlich gegenüber Verschiebungen, die Phasen jedoch profitieren von einem nahen Abstand. Werden die Phasen für z.B. Berechnung von Beschleunigungen am Schiff benötigt, muss die Position der Wellensonden sorgfältig überlegt werden.

In Abbildung 8 sind sowohl die gemessenen Wasserspiegelauslenkungen mit den dazugehörigen Fourierspektren für die zwei Wellenpakete für unterschiedliche Frequenzbereiche. Die Wasserspiegelauslenkungen sind mit der am Schleppwagen befestigten Wellensonde gemessen worden. Das Fourierspektrum ist daher über der Begegnungsfrequenz aufgetragen. An dem im zweiten Wellenpaket gemessenen Fourierspektrum lässt sich schön sehen, wie das Spektrum um den Scheitelpunkt  $\omega_0=1.36\text{ rad/s}$  ( $6.47\text{ rad/s}$  im Modellmaßstab) herum in den Frequenzbereich mit niedrigeren Frequenzen gespiegelt wurde.

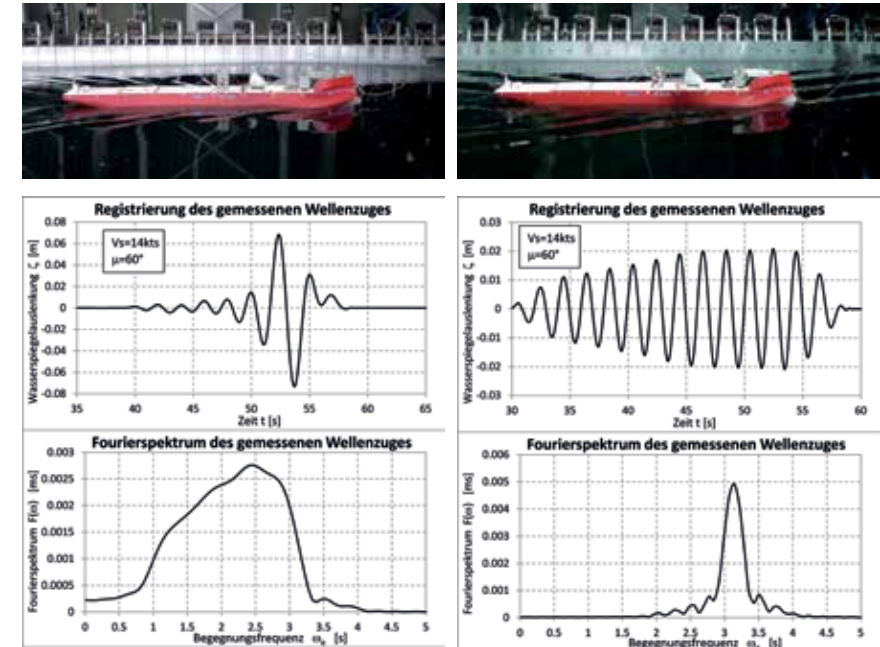


Abb. 8: Versuch bei einer Schiffsgeschwindigkeit von 14kts und einem Welleneinfallswinkel von  $300^\circ$  ( $\cong 60^\circ$ ) in zwei Wellenpaketen mit unterschiedlichen Frequenzbereichen (im Modellmaßstab)

Alle Zeitregistrierungen der Wasserspiegelauslenkungen sowie Bewegungen werden von mitfahrenden Messgeräten gemessen. Werden die Fourierspektren direkt aus den gemessenen Zeitregistrierungen abgeleitet sind sie eine Funktion der Begegnungsfrequenz. Damit sind auch die Übertragungsfunktionen, die gemäß Gleichung (1) aus den Fourierspektren der Bewegungen zum Fourierspektrum der Wasserspiegelauslenkung abgeleitet wurden, eine Funktion der Begegnungsfrequenz  $\omega_e$ . Sie müssen zunächst vom Begegnungsfrequenzbereich in den Wellenkreisfrequenzbereich umgerechnet werden:

$$\omega_0 = \frac{1 \mp \sqrt{1 - \frac{4 \cdot V_s \cos \mu \cdot \omega_e}{g}}}{\frac{2 \cdot V_s \cos \mu}{g}} \quad (3)$$

Für den Teil der Übertragungsfunktion, die für den Frequenzbereich unterhalb der Scheitelfrequenz gilt, kommt die erste Lösung mit dem Minuszeichen aus Gleichung (3) zum Tragen. Für diejenige oberhalb des Scheitelpunkts gilt die zweite Lösung mit dem Pluszeichen. Anschließend muss diese zweite Übertragungsfunktion noch um den Scheitelpunkt (Maximum der Begegnungsfrequenz, siehe Abbildung 6), gespiegelt werden. Dies ist am Beispiel der Längsbewegung ( $V_s=14\text{ kts}$ ,  $\mu=60^\circ$ ) in Abbildung 9 dargestellt. Das



kleine Stück der Übertragungsfunktion aus dem oberen Frequenzbereich ist zunächst um den Scheitelpunkt geklappt dargestellt (rote Linie), wie es sich direkt aus der Anwendung von Gleichung (1) ergibt. Erst durch die Spiegelung (Mirror RAO Data, Abbildung 9) wird sie in den oberen Frequenzbereich gebracht, wo sie hingehört.

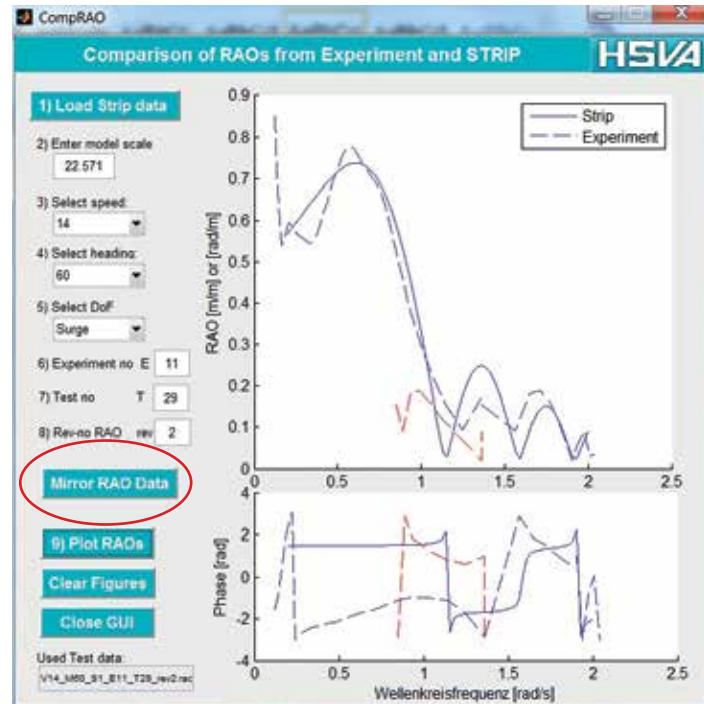


Abb. 9: Zusammensetzung der Übertragungsfunktion ermittelt aus zwei Wellenpaketen mit unterschiedlichem Frequenzbereich

In Abbildung 10 sind die Übertragungsfunktionen der sechs Starrkörperbewegungen (längs, quer, tauchen, rollen, stampfen, gieren) des Schiffes wieder bei 14 Knoten Geschwindigkeit und einem schräg achterlichen Welleneinfallswinkel von 60° dargestellt. Mangels entsprechender experimenteller Ergebnisse wurden die ermittelten Übertragungsfunktionen mit numerisch berechneten Übertragungsfunktionen verifiziert, die mit einer linearen Streifenmethode (STRIP) berechnet wurden. Der Vergleich zeigt, dass die experimentell bestimmten Werte sehr gut mit den numerischen Ergebnissen übereinstimmen, was sowohl Betrag als auch Phase betrifft. Allerdings kann man auch erkennen, dass manche der zusammengesetzten Übertragungsfunktionen gegebenenfalls nachbearbeitet werden müssen, um Übergänge etwas geschmeidiger zu machen. Dies erfordert etwas Fingerspitzengefühl, stellt aber kein Problem dar.

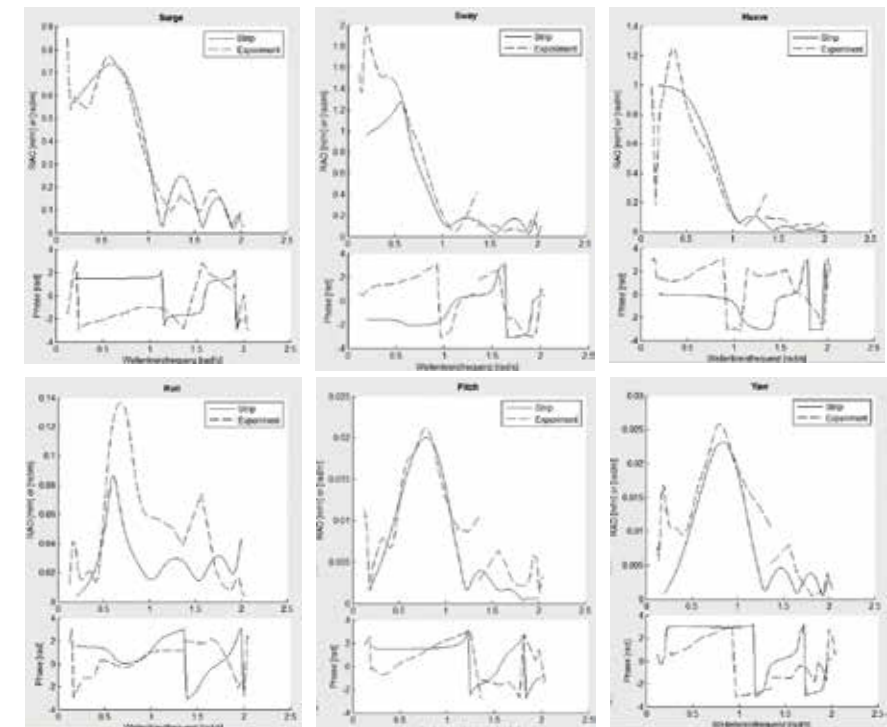


Abb. 10: Übertragungsfunktionen nach Betrag und Phase der sechs Starrkörperbewegungen eines Schiffes mit einer Geschwindigkeit von 14kts bei einem Welleneinfallswinkel von 60°

Um das Seegangverhalten eines Schiffes bei einer bestimmten Geschwindigkeit umfassend zu bestimmen, sind mit diesem neuen Verfahren höchstens 19 Versuchsfahrten in Wellenpaketen notwendig: Für Welleneinfallswinkel von 90° bis 180° ist jeweils eine Fahrt in einem Wellenpaket über den gesamten Frequenzbereich erforderlich, also 7 Fahrten, wenn der Welleneinfallswinkelbereich in 15° Schritten untersucht wird. Zwischen 0° und 75° sind durchschnittlich 2 Fahrten pro Welleneinfallswinkel (abhängig von der Geschwindigkeit), dies ergibt 12 Fahrten.

Mit diesen 19 Versuchen ist nun also das Seegangverhalten umfassend für eine Geschwindigkeit bestimmt. Werden statistische Werte, z. B. die signifikanten Amplituden in einem bestimmten Seegang benötigt, so kann nun die quadrierte Übertragungsfunktion  $H(\omega)$  mit dem Energiedichtespektrum  $S(\omega)$  multipliziert werden:

$$S_{antwort}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S(\omega) \quad (4)$$

Für jedes Seegangsspektrum wird ein Antwortspektrum erzeugt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 11 für eine ganze Palette an Seegängen mit unterschiedlichen Zero-upcrossing Perioden. Daraus kann direkt die gesuchte signifikante Amplitude (SSA) der Antwort berechnet werden:

$$SSA = 2 \sqrt{\int_0^{\infty} S_{antwort}(\omega) \cdot \omega \cdot d\omega} \quad (5)$$

Die signifikanten Amplituden entsprechen den Ergebnissen, die man aus den Standardseegangversuchen gewinnen kann, jedoch ist für jeden einzelnen Seegang ein Versuch notwendig.

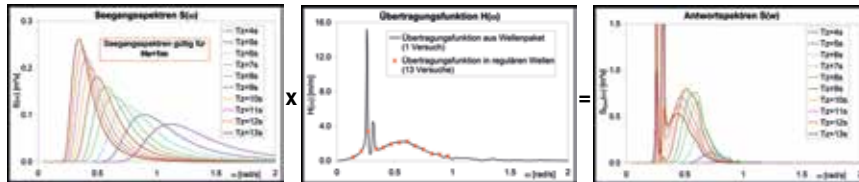


Abb. 11: Schematische Darstellung der stochastischen Analyse zur Ermittlung der Antwortspektren in verschiedenen Seegängen mit unterschiedlichen Zero-upcrossing Perioden  $T_z$

### Einfluss von Kurzkämmigkeit und Dünung auf das Seegangverhalten

Kurzkämmige Seegänge sind dadurch geprägt, dass Wellen nicht nur aus einer Richtung kommen. Der Seegang weist zwar eine Hauptaufrichtung auf, beinhaltet jedoch immer auch Komponenten aus anderen Richtungen. Dies beeinflusst natürlich auch das Seegangverhalten von Schiffen insofern, dass die charakteristischen Antworten (z. B. die signifikanten Amplituden) etwas weniger ausgeprägte Maxima zeigen, dafür auch die Minima höher als im langkämmigen Seegang ausfallen.

Für die Einbeziehung des Einflusses der Kurzkämmigkeit auf das Bewegungsverhalten sind auch die Übertragungsfunktionen für alle Richtungen, aus denen der Seegang kommt, erforderlich. Mit den Anteilen der Energiedichtespektren der verschiedenen Richtungen und den jeweiligen Übertragungsfunktionen können die Beiträge an den Bewegungen bestimmt werden. Um diese Anwendung möglichst umfassend zu ermöglichen, wurde entschieden, dass das Programmpaket Uthlande um das Einlesen von externen Übertragungsfunktionen erweitert wird. Auch für die Berücksichtigung der Dünung auf das Bewegungsverhalten wird Uthlande so erweitert, dass benutzerdefinierte Spektren eingelesen werden können. Damit können die

Dünung in spektraler Weise berücksichtigt werden. Diese Erweiterungen in Uthlande sind zurzeit in Arbeit und werden demnächst abgeschlossen sein.

### Zusammenfassung

Mit der Entwicklung eines modularen Verfahrens zur Ermittlung des Bewegungsverhaltens von Schiffen im Seegang ist es nun möglich, mit einigen wenigen Versuchen von sehr kurzer Dauer das Bewegungsverhalten von Schiffen mit Vorwärtsgeschwindigkeiten umfassend bezüglich Seegang und Wellenbegegnungswinkel zu bestimmen. Mit der Berücksichtigung von Kurzkämmigkeit und Dünung ergibt sich ein Verfahren, mit dem das Bewegungsverhalten von Schiffen im realistischen (bzw. natürlichen) Seegang sehr genau prognostiziert werden kann.

### Danksagung

Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren für eine effiziente Bestimmung des Seegangsverhaltens von Schiffen wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen 03SX338A) gefördert.

### Literatur

- [1] Jacobsen, K. (2011). HSVA's New Side Wave Generator – Demonstrator Now Operating. HSVA Newswave, No. 2011/1
- [2] Kühnlein, W. (1997). Seegangsversuchstechnik mit transienter Systemanregung. Dissertation, Technische Universität Berlin (D 83).

## IRO-2, Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung

Förderkennzeichen: 03SX328

Nils Reimer (Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH)

Prof. Dr. Lars Kaleschke (Universität Hamburg)

Dr. Mikhail Dobrynin (Universität Hamburg)

### Einleitung

Innerhalb der letzten Dekaden war ein deutlicher Rückgang der Eisausdehnung in der Arktis zu beobachten. Die hiermit verbundene Erwartung eines wachsenden Seetransportaufkommens in hohen Breiten führt zu einem Bedarf an Navigations- und Routenplanungssystemen, die speziell den besonderen Anforderungen der Schifffahrt in eisbedeckten Gewässern gerecht werden. Die Motivation zur Entwicklung solcher Systeme ergibt sich dabei sowohl aus wirtschaftlicher Sicht als auch aus der notwendigen Verbesserung der Sicherheit des Seetransportes entlang arktischer Routen.

Innerhalb des Verbundvorhabens IRO-2, Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung wurde ein Prototyp für ein Routenoptimierungssystem basierend auf einer modellgestützten Eisvorhersage entwickelt. Die Grundidee des Systems besteht in der Bereitstellung der wichtigsten Eisdaten für einen Zeitraum von etwa sechs Tagen im Voraus sowie der Einbindung dieser Daten in ein Routenmodul, das unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Schiffes in unterschiedlichen Eisverhältnissen eine Verringerung der Fahrtzeit durch Optimierung der Route erzielt.

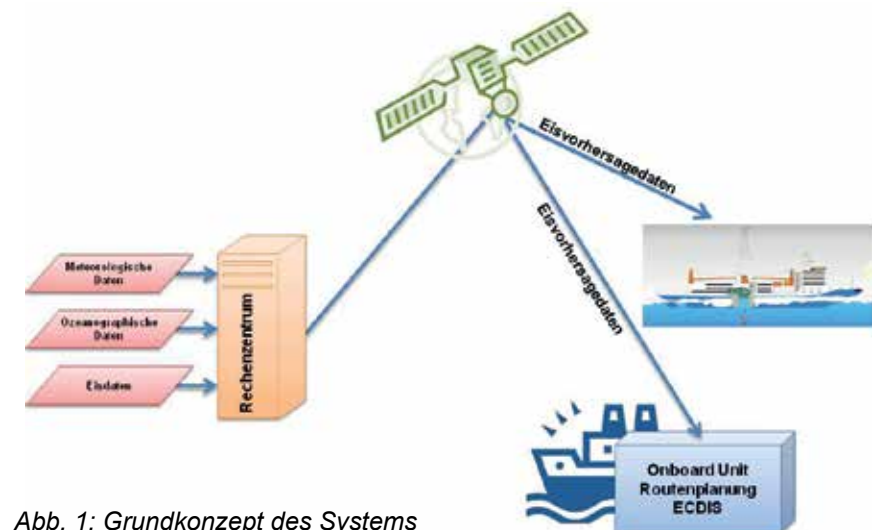


Abb. 1: Grundkonzept des Systems

Die Eisvorhersage basiert ihrerseits auf einem arktisweiten Modell, angetrieben und initialisiert von Fernerkundungsdaten der Eiskonzentration sowie Eis- und Schneedicke. Die Dynamik der Eisverhältnisse wird dabei mit Hilfe von globalen Wetter- und Ozeanmodellen angetrieben. Mittels Datenassimilierung des arktisweiten Eisvorhersagemodells wird die Modellausgabe stabilisiert und durch Bewertung und Gewichtung der Beobachtungsdaten in ihrer Genauigkeit verbessert.

Die Ausgaben des arktisweiten Modells dienen dazu, ein regionales Eisvorhersagemodell mit hoher räumlicher Auflösung zu betreiben. Dieses Modell liefert eine Vorhersage für die Eiskonzentration, Eisdicke sowie die Wind- und Strömungsdaten für die nachfolgenden sechs Tage. Innerhalb der Prototypenentwicklung beschränkte sich das regionale Eisvorhersagemodell auf den Bereich der Barentssee.

## Struktur des Vorhabens und Arbeitspakete

### Formale Struktur des Verbundvorhabens

Das Vorhaben IRO-2 gliederte sich in sechs Arbeitspakete (siehe Abbildung 2) wobei jedes Arbeitspaket unter Beteiligung mehrerer Wissenschaftler von einer Person verantwortlich geleitet wurde. Die Gesamtkoordination des Vorhabens lag bei der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt GmbH (HSVA), im Projekt vertreten durch den Koordinator Peter Jochmann. Neben der HSVA waren folgende Verbundpartner am Projekt beteiligt:

- Alfred-Wegener-Institut (AWI)
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
- Firma FastOpt
- Firma O.A.Sys
- Universität Bremen (Uni HB)
- Universität Hamburg (Uni HH)

Um die Entwicklung des Prototyps für das Routenoptimierungssystem von Beginn an den Anforderungen aus der Schifffahrt und Meerestechnik anzupassen, wurde ein wissenschaftlich-technischer Beirat bestehend aus Vertretern der Branche gegründet, der auf regelmäßigen Treffen über den Fort-

schritt und die inhaltlichen Entwicklungen informiert wurde und hierzu aus professioneller und operativer Sicht Stellung beziehen konnte.

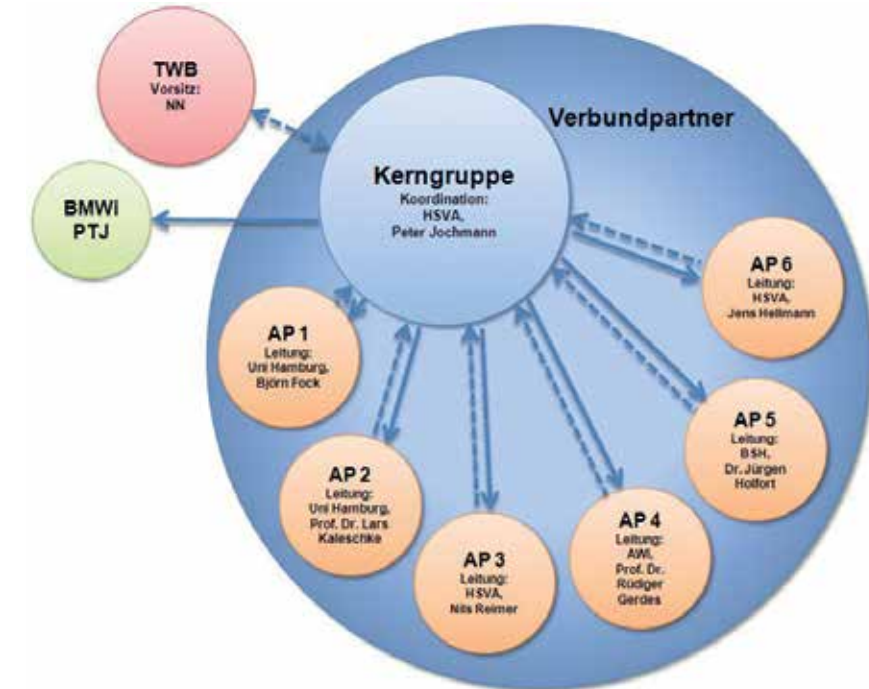


Abb. 2: Struktur des Verbundes, Koordinators und Beirates sowie der Arbeitspakete

### Inhaltlicher Aufbau des entwickelten Systems

Am Anfang des Systems zur Eisvorhersage stehen die Antriebs-, und Fernerkundungsdaten, ihre räumliche und zeitliche Verfügbarkeit hat einen hohen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Gesamtsystems. Die Eingabedaten beinhalten dabei sowohl Wetter- und Ozeandaten als auch Fernerkundungsdaten der Eiskonzentration sowie Eis- und Schneedicke. Die Daten fließen in das arktisweite assimilierte Modell ICEDAS<sup>1</sup> ein, in dem dann die erste grob aufgelöste Vorhersage modelliert wird. Das regionale, feinskalige Eisvorhersagemodell HAMMER<sup>2</sup> mit einer Auflösung von 5km erhält nun die Vorhersage des Arktisweiten Modells und kann diese für jeden Zeitschritt verwenden um Rand- und Anfangswerte möglichst aktualisiert einzubinden.

<sup>1</sup>ICEDAS: Ice Data Assimilation System

<sup>2</sup>HAMMER: Hamburger System für Mesoskalige Eisvorhersage



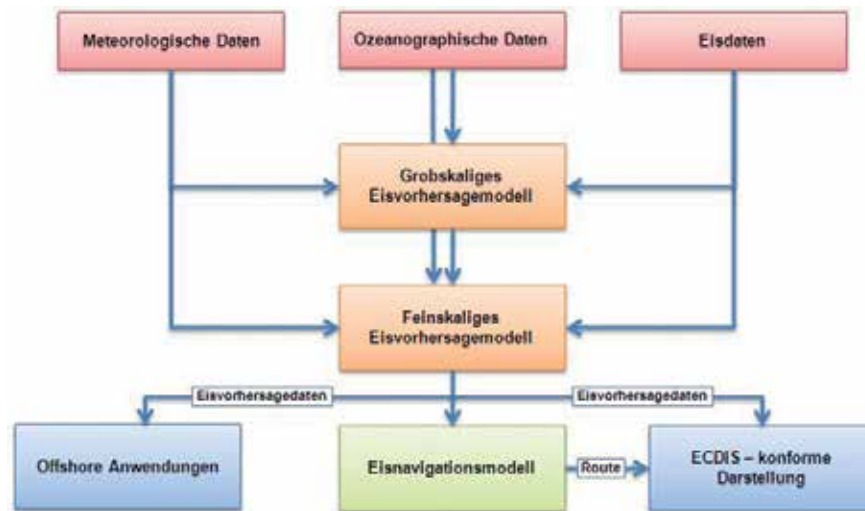


Abb. 3: Flussdiagramm zur Darstellung des Gesamtsystems und seiner Schnittstellen

An hinterer Position der Prozesskette steht das Routenoptimierungsmodell, das die Eingabegrößen zur Beschreibung der Eissituation aus dem regionalen Vorhersagemodell erhält und diese zur Berechnung der Schiffsgeschwindigkeit und anschließenden Erstellung und Bewertung einzelner Routenvarianten verwendet. Das Modul übergibt schließlich die Routenparameter (Wegepunktliste und Geschwindigkeiten) im ECDIS Format und die elektronische Navigationssoftware an Bord. Die Eisdaten sollen ebenfalls im geeigneten Format übergeben werden und in standardisierter Form als zusätzliches Layer dargestellt werden können um dem nautischen Personal eine möglichst umfangreiche Übersicht zu liefern (Abb. 3).

## Die einzelnen Bestandteile des Systems

### Fernerkundung und Modellantrieb

Zur Initialisierung der Eisparameter im arktisweiten Modell und im regionalen Modell sind möglichst hochaufgelöste Beobachtungsdaten erforderlich. Für das Projekt standen die Daten der neuen Satellitenmissionen AMSR2<sup>3</sup> [2] und SMOS<sup>4</sup> zur Verfügung.

<sup>3</sup>AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2

<sup>4</sup>SMOS: Soil Moisture and Ocean Salinity Mission

Für den SMOS Sensor, der ursprünglich mittels L-Band Radiometer die Bodenfeuchte und Salinität des Ozeans bestimmt, wurde ein Eisdickenprodukt basierend auf der Abhängigkeit der Helligkeitstemperatur von der Dicke und Konzentration des Meereises unter Annahme konstanter Salinität und Temperatur im Eis entwickelt [3]. Das Produkt liefert die Eisdicke mit guter Genauigkeit für dünnes Eis (< 0.5m) wohingegen die Unsicherheit bei dickerem Eis erheblich ansteigt (siehe Abb. 4).

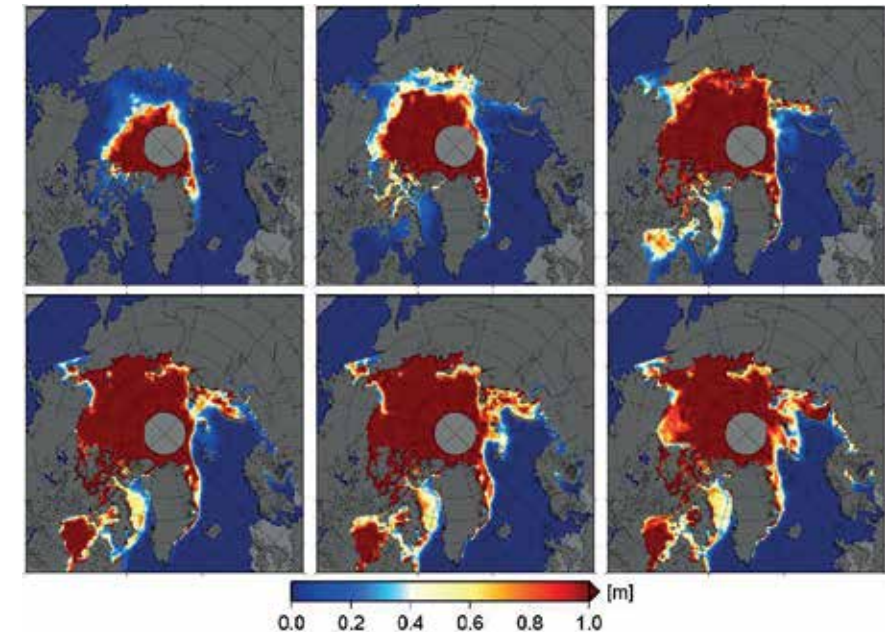


Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der arktischen Meereisdicke aus SMOS-Satellitendaten. Monatsmittel über den Zeitraum Oktober 2012 bis März 2013. Tian-Kunze et al. (2014).

Während die Güte der Algorithmen zur Bestimmung der Eiskonzentration aus Satellitendaten relativ gut bekannt sind, befinden sich die Eisdickenprodukte teilweise noch in der Startphase, daher sollen die Messdaten, die während der Erprobungsfahrt in der Barentssee erfasst wurden zur weiteren Validierung genutzt werden.

### Modellierung der regionalen Eisvorhersage

Die Regionale Eisvorhersage wird mit dem Hamburger System für Mesoskalige Eisvorhersage zur Routenoptimierung (HAMMER) der Universität Hamburg erstellt. Die Kopplung des Meereis-Atmosphäre Modells METRAS/MESIM mit einem Ozeanmodell HAMSOM erlaubt es, die Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre, Ozean und Meereis zu erfassen.



sen. Das HAMMER System führt vorhandene meteorologische und ozeanographische Vorhersagemodelle zusammen und optimiert diese hinsichtlich ihrer Rechenzeit und Güte der Eisprognose. Die räumliche Auflösung des Modells beträgt 5x5 km<sup>2</sup>. Es kann eine Vorhersage für die vorausliegenden sechs Tage liefern [3] [4].

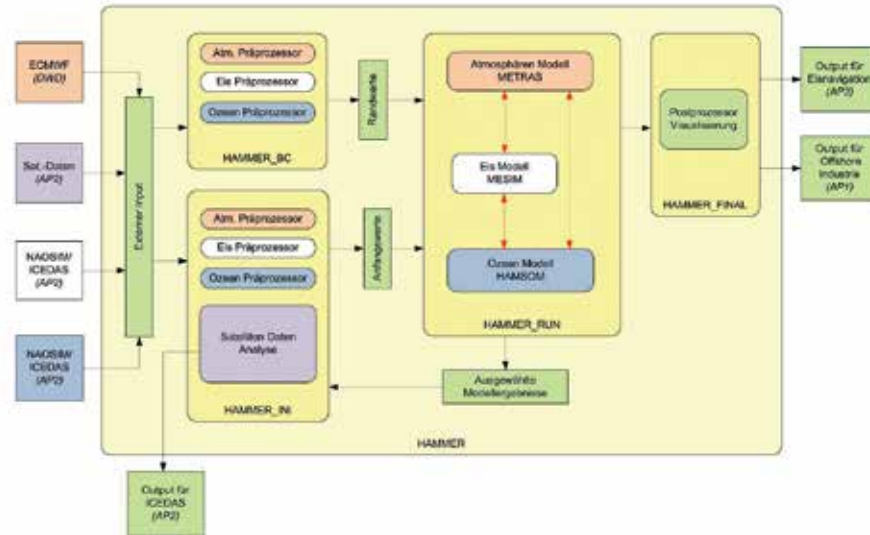


Abb. 5: Datenfluss und Komponenten von HAMMER [3]

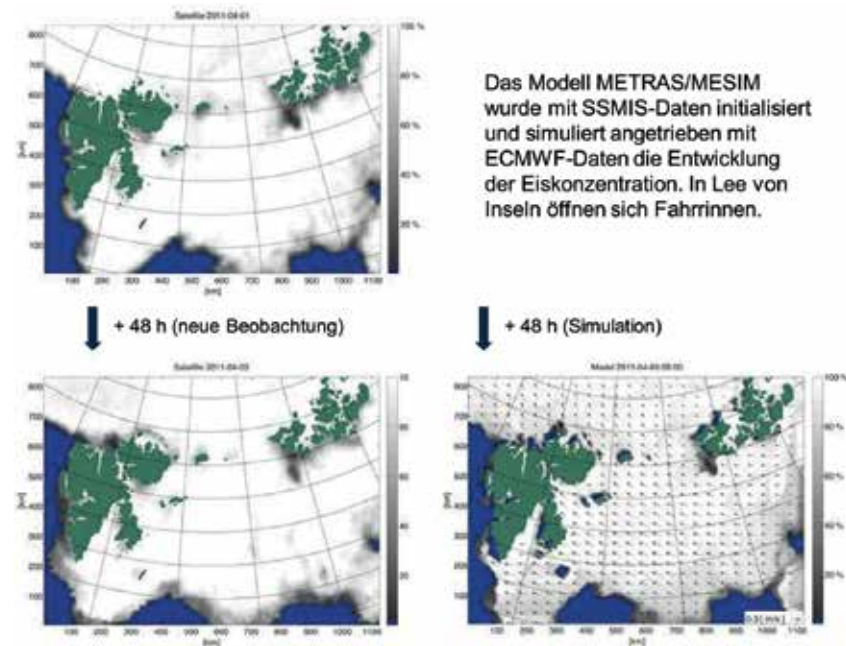


Abb. 6: Ergebnisse aus dem Vergleich der Eismodellierung von HAMMER mit Satellitendaten [4]

## Navigationsmodul und Routenoptimierung

Die Routenoptimierung basiert auf einer Prognose der Geschwindigkeit des jeweiligen Schiffes in unterschiedlichen Eisverhältnissen. Die Kenntnis über die Geschwindigkeit ist notwendige Bedingung für die Vorhersage der Position zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Eisparameter aus dem Vorhersagemodell werden dann für jeden Ort und Zeitpunkt individuell berücksichtigt, um die Geschwindigkeit auf dem nächsten Streckenabschnitt zu ermitteln. Auf diese Weise können unterschiedliche Routen bewertet und untereinander verglichen werden.



Abb. 7: Modellversuche: Geschwindigkeit in unterschiedlichen Eisbedingungen

In der HSVA stehen zur Entwicklung von Prognosen der Geschwindigkeit im Eis Modellversuchsergebnisse zur Verfügung. Außerdem wurde innerhalb des Vorhabens eine Modellversuchskampagne mit variierenden Eisparametern durchgeführt. Die Kampagne beinhaltete 13 Versuchsserien mit zwei unterschiedlichen Schiffsmustern in gebrochenem Eis unterschiedlicher Konzentration, Presseisrücken und ebenem Eis mit seitlichem Druck (Abb. 7).

Die Ergebnisse der Modellversuche stellen einen Zusammenhang zwischen den Eisverhältnissen und dem Schiffswiderstand her. Unter Berücksichtigung der Propulsionsanlage kann hieraus schließlich die maximal erreichbare Geschwindigkeit in Bezug zu den Eisdaten bestimmt werden (Abb. 8).

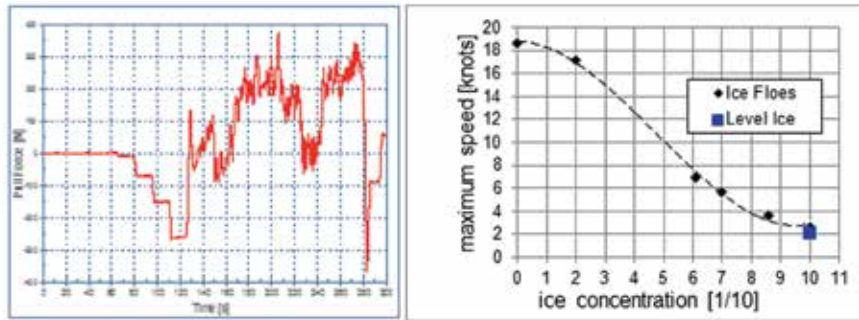


Abb. 8: Messschrieb der Koppelkraft im Schleppversuch, Geschwindigkeit in Schollen

Für die Routenoptimierung wird zunächst die kürzeste Route zwischen vorgegebenem Start und Endpunkt berechnet. Die Route wird in Teilabschnitte mit Knotenpunkten gegliedert. Die Berechnung der Fahrzeit erfolgt iterativ, da die Geschwindigkeit und damit die Ankunftszeit am nächsten Knotenpunkt zunächst unbekannt sind. Das System gibt eine Anfangsgeschwindigkeit vor und prüft dann, ob auf der Strecke bereits Eisbedingungen des nächsten Zeitschrittes einbezogen werden müssen. Ist die Ausgangsroute vollständig berechnet, können Wegepunkte variiert werden. Hierzu werden die Eisbedingungen in einem Fenster um jeden Wegepunkt der Route geprüft (siehe Abb. 9) Wegepunkte in ungünstigen Eisbedingungen werden entlang der Gradienten des Eisindex verschoben. Letzterer beinhaltet Eiskonzentration und Eisdicke.

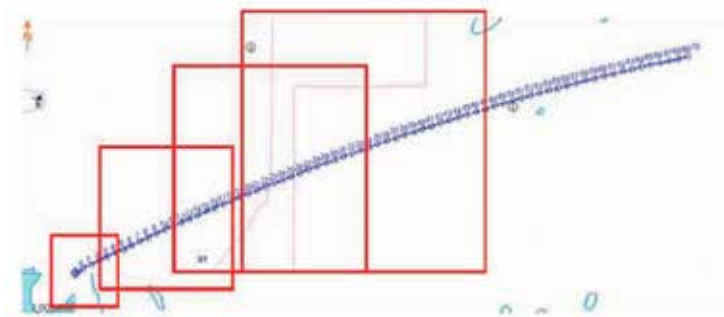


Abb. 9: Fenster zur Überprüfung der Eisverhältnisse in der Umgebung der Wegepunkte

Die Länge der Strecke nimmt bei der Variation stetig zu. Nach der Variation der Wegepunkte wird für die Variation die Topologie nachgepflegt, so dass überflüssige Umwege vermieden werden (siehe Abb. 10).

Für jede Routenoption werden die Wegepunkte mit ihren Koordinaten sowie die Geschwindigkeiten als Liste im RT3 Format ausgegeben. In dieser Form können die Routen direkt in die elektronische Navigationssoftware eingelesen und dort weiter bearbeitet werden. Für ein operationelles System sollte eine manuelle Editierung durch die Schiffsführung möglich sein, um die Route an weitere Anforderungen anpassen zu können. In diesem Fall soll die bearbeitete Route dann von Bord aus wieder an das Optimierungszentrum geschickt und dort neu berechnet werden.

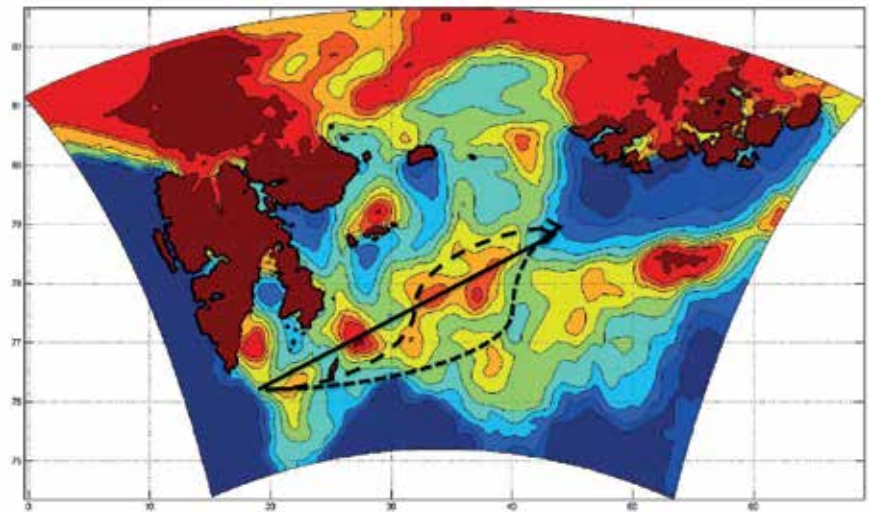


Abb. 10: Routenoptimierung, kürzeste Route und Variationen durch leichtere Eisverhältnisse

### Standardisierte Darstellung und Einbindung in ECDIS Software

Die Ergebnisse aus der Eiseisvorhersage und der Routenoptimierung sollen dem nautischen Personal an Bord in gewohnter und standardisierter Form präsentiert werden können. Da die ECDIS Einheiten von der Klassifikationsgesellschaft zertifiziert werden müssen, ist die Einhaltung der Standards unbedingt notwendig. Die Eisinformationen werden im WMO Color Code in Form von Karten-Layern eingebunden. Während der Laufzeit des Projektes wurde der neue Standard für Eisinformationen in elektronischen Seekarten S411 von den Eisdiensten definiert und eingeführt. Dieser wurde aber von den Herstellern der ECDIS Einheiten noch nicht eingepflegt, so dass im Projekt der bestehende Standard verwendet wurde.

Es sind jeweils Karten mit Information zu Eiskonzentration, Entwicklungsstatus (Eisdicke), Eisdrift und Konvergenz verfügbar (siehe Abb. 11 und 12), die als Layer mit unterschiedlichem Transparenzgrad über die eigentliche Seekarte



gelegt werden können. Für den Entwicklungsstatus werden von den Eisdienst-Klassen definiert, die jeweils einen Bereich von Eisdicken beinhalten.

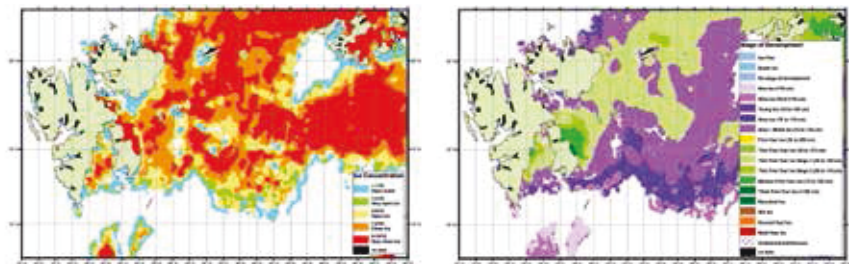


Abb. 11: Farbliche Darstellung von Eiskonzentration und Entwicklungsstand [5]

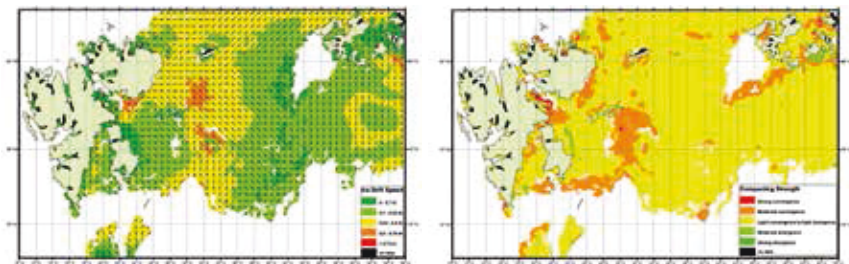


Abb. 12: Farbliche Darstellung der Eisdrift und Konvergenz [5]

### Erprobungsfahrt mit dem Forschungsschiff Lance

Zum Praxistest des Zusammenwirkens aller Komponenten des Systems wurde eine 14-tägige Erprobungsfahrt mit dem norwegischen Forschungsschiff Lance in das Projekt eingebunden. Die Erprobungsfahrt fand im Zeitraum vom 15.03.2014 bis zum 29.03.2014 im Seegebiet östlich von Spitzbergen statt. An Bord befanden sich 18 Wissenschaftler sowie 11 Crewmitglieder.

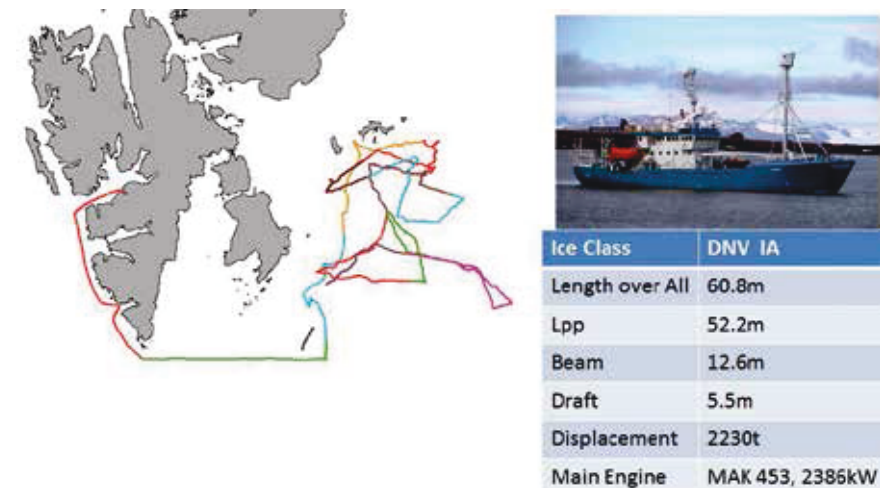


Abb. 13: Übersicht über Fahrtgebiet und Schiff der Erprobungsfahrt im März 2014

Neben der Erprobung des Routensystems wurden zeitgleich durchgehend Wetter-, Eis- und Ozeandaten ermittelt. Diese Daten (z. B. Abb. 15) dienen der anschließenden Validation einzelner Komponenten des Vorhersagesystems HAMMER und bilden darüber hinaus einen wertvollen Messdatensatz eines bisher wenig erfassten Gebietes.

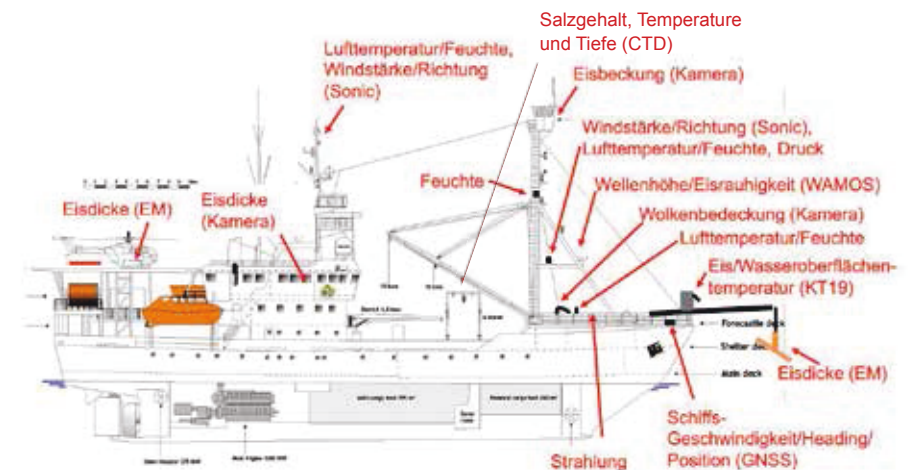


Abb. 14: Zusätzliche Messungen und Beobachtungen während der Fahrt

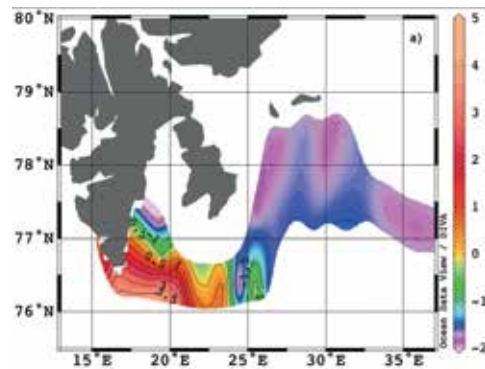


Abb. 15: Oberflächen Wassertemperatur (°C) während der Fahrt (CTD Messungen, Barentssee, März 2014)

Die Bestimmung der Eisparameter wurde sowohl messtechnisch auf Basis elektro magnetischer Induktion (EM31 Sensor des AWI) als auch mittels Beobachtung der Wissenschaftler sowie per Kamera-Dokumentation durchgeführt. Hierfür waren zwei Beobachtungsteams in jeweils mehreren Schichten rund um die Uhr tätig. Da zeitgleich auch die wichtigsten Kenngrößen wie Geschwindigkeit (NMEA Protokoll), Fahrhebelstellung, Drehzahl und Steigung des Propellers im Fahrstand auf der Brücke mitgeschrieben wurden, kann eine Auswertung der Eisbrechfähigkeit mit der Prognose des Routensystems verglichen werden.

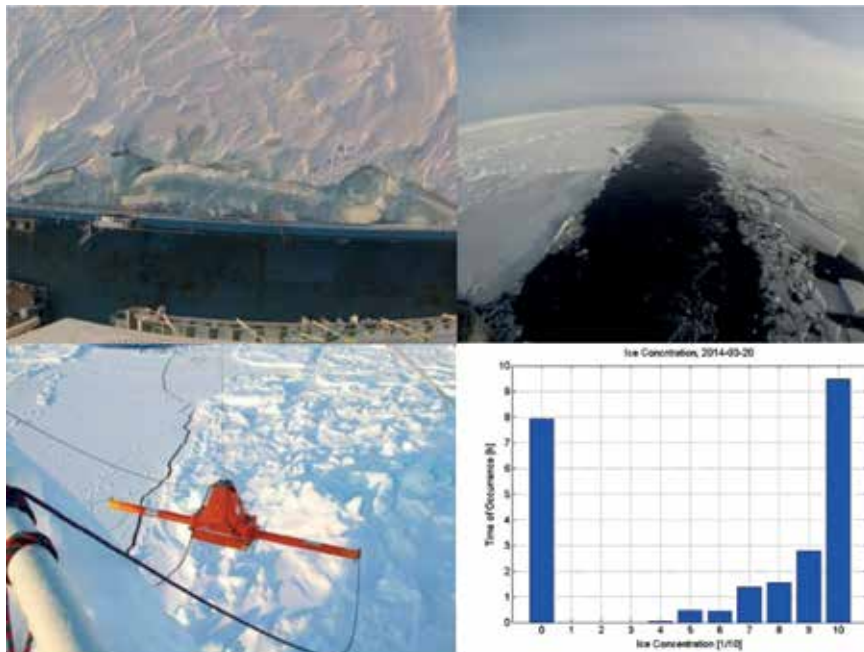


Abb. 16: Kamerabeobachtungen der unmittelbaren Eisverhältnisse, Verteilung Eiskonzentration

Für die Validierung der Satellitenprodukte war es wichtig, die Eissituation im Erprobungsgebiet flächendeckender zu erfassen und möglichst Vergleichsdaten im Bereich der Überflugbahnen der Satelliten zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden Messflugkampagnen per Helikopter von RV Lance sowie Flüge der Polar 5 von Spitzbergen aus durchgeführt. Weiterhin wurde eine begleitende Bojenmesskampagne durchgeführt um die Eisdrift im Erprobungs- und Modellierungsgebiet validieren zu können.

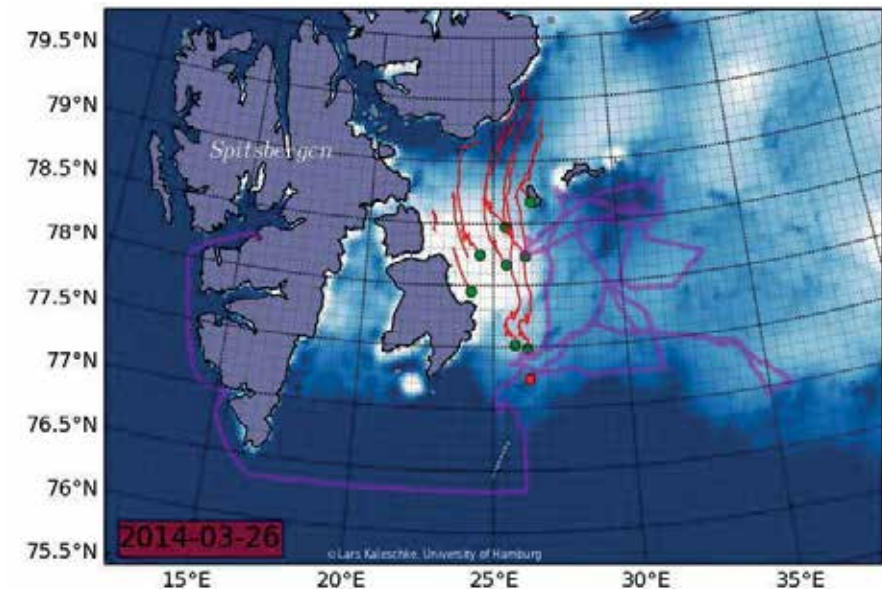


Abb. 17: Trajektorien der autonomen Eisdrift-Sensoren (rote Linien, grüne Punkte) und von RV Lance am 26. März 2014. Im Hintergrund ist das Eisvolumen aus Satellitendaten (SMOS und AMSR2) qualitativ farbcodiert dargestellt.

Zum eigentlichen Test der Routenoptimierung wurden die gewünschten Start- und Zielkoordinaten von Bord aus per E-mail nach Hamburg übermittelt. Hier wurde anschließend unter Berücksichtigung des aktuellsten Modelllaufes der Eisvorhersage Routenvarianten mit den zugehörigen Fahrtzeiten berechnet und zurück an Bord geschickt. Es zeigte sich, dass die eingeschränkten Datenübertragungsraten mit dem vorhandenen Iridium Open Port System eine Schwierigkeit für den reibungslosen Ablauf eines operationellen Systems darstellen würde.

An Bord konnten die übermittelten Routenvorschläge verglichen werden. Anschließend wurden sie dem verantwortlichen Schiffsführer vorgelegt und nach dessen Freigabe in die bordeigene ECDIS Einheit eingegeben. Das Schiff versuchte nun dem Routenvorschlag unter Berücksichtigung der unmittelbaren Eisnavigation im Sichtbereich möglichst exakt zu folgen.



Während der Erprobungsfahrt wurden insgesamt 10 Routenvorschläge getestet und vollständig abgefahren.

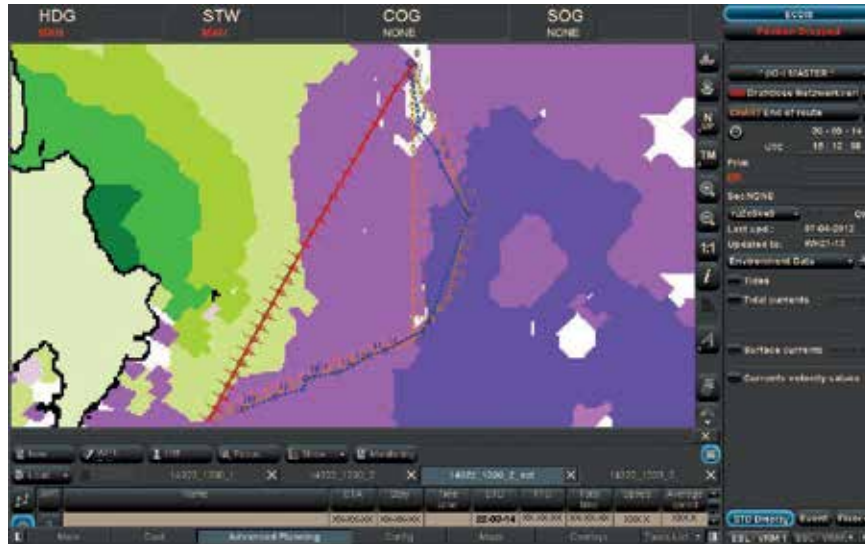


Abb. 18: Beispiel für unterschiedliche Routenvarianten abweichend von der Kürzesten

Da die Eisbrechfähigkeit von RV Lance aufgrund seiner Hauptmaschinenleistung begrenzt ist, wurden immer wieder auch Eisverhältnisse angetroffen, in denen das Schiff nur mühsam durch Einsatz von Rammstößen voran kam. Dies führte dazu, dass die Crew des Schiffes teilweise Routenvorschläge bevorzugte, die sie als kontinuierlich abfahrbar einstufte.

Für das Beispiel in Abbildung 18 ergab sich eine Fahrtzeit von 18 Stunden und 31 Minuten für die dritte Routenoption, die im großen Bogen um die Bereiche dickeren Eises führte. Das System hatte für diese Routenoption eine Fahrtzeit von 15 Stunden und 16 Minuten vorausgesagt. Hieraus ergibt sich eine Abweichung von 21%.

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Schlussfolgerungen zur Entwicklung der Eisvorhersage und der Routenoptimierung ergeben sich aus dem Austausch der Verbundpartner untereinander, dem Input des technischen Beirates sowie aus Erfahrungen, die während der Erprobungsfahrt gewonnen wurden.

- Das System ließ sich ohne Einschränkungen im Praxistest einsetzen. Alle einzelnen Komponenten und Schnittstellen haben zuverlässig funktioniert.

- Die Einbindung in vorhandene Bordsysteme war erfolgreich die Akzeptanz des Systems als zusätzliche Planungshilfe bei dem nautischen Personal war vorhanden.
- Die Mittelung der Eisparameter über eine Gitterzelle von 5km kann bei kürzeren Strecken immer noch zu relativen Fehlern über 20% bei der Fahrtzeitprognose führen.
- Zur besseren Erfassung der lokalen Struktur von unregelmäßigen Eisformationen sind hochaufgelöste Satellitendaten erforderlich.
- Diese Daten müssen durch geeignete Algorithmen klassifiziert werden um in die Routenoptimierung integriert werden zu können.
- Neben den Parametern Eiskonzentration und Eisdicke sind weitere Parameter wie Schollengröße, Eisdruck sowie Verteilung der Presseisrücken zu erfassen und einzubeziehen.
- Potentiell gefährliche Routen, zum Beispiel Routen dicht unter Land bei Driftänderung (Abb. 19) sollen durch die Routenoptimierung erkannt und vermieden werden.

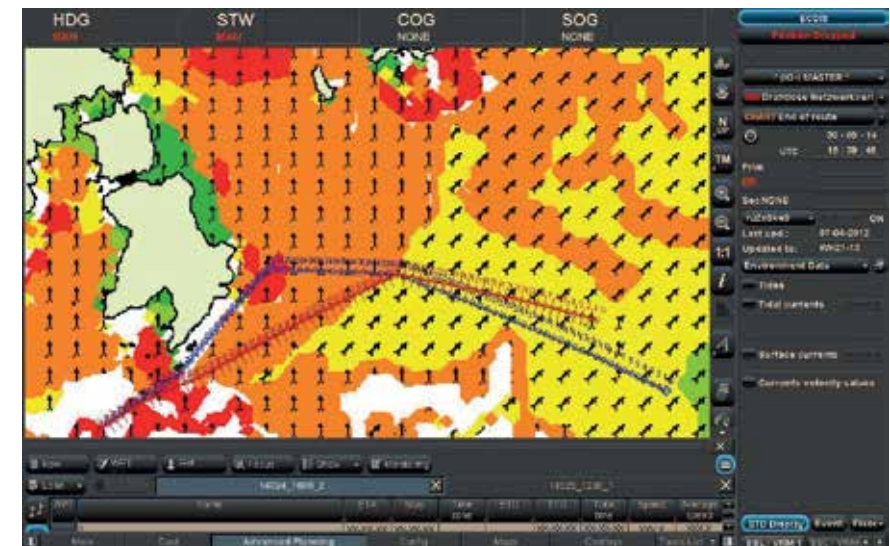


Abb. 19: Routenoption entlang der Küstenlinie bei ablandiger Drift, Gefahr bei Driftrichtungswechsel

## Literatur

- [1] Jochmann, P.: Eis Vorhersage und Eis-Routen-Optimierung (IRO-2), Leitantrag zum verbundvorhaben IRO-2, Hamburg, September 2014
- [2] Beitsch, A.; Kaleschke, L.; Kern, S. Investigating High-Resolution AMSR2 Sea Ice Concentrations during the February 2013 Fracture Event in the Beaufort Sea. Remote Sens. 2014, 6, 3841-3856. []
- [3] Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., Maass, N., Maekynen, M., and Drusch, M. : Sea ice thickness retrieval from SMOS brightness temperatures during the Arctic freeze-up period, Geophys. Res. Lett., doi:{10.1029/2012GL050916}, 2012
- [4] IfM, MI: Enjtwicklung eines Eisvorhersagesystems und Satellitenfern-erkundung, Vorhabensbeschreibung zum Teilprojekt im Verbundvorha ben IRO-2, Hamburg 2011
- [5] Fock, B., Beitsch, A., Broehan, D., Dobrynin, M., Gierisch, A., Kalesch ke, L., Pohlmann, T., Schlünzen K.H.: Ice Forecast and Route Optimi zation, Poster, SMOS Ice Workshop, Hamburg, 2012
- [6] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie: Eiskarten für den Zeitraum März 2014, Spitzbergen Barentssee, RV Lance, März 2014

## SUGAR II – Submarine Gashydrat-Lagerstätten, Erdgasproduktion und CO<sub>2</sub>-Speicherung

Förderkennzeichen: 03SX320

Prof. Dr. Klaus Wallmann (GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozean- forschung, Kiel) und das SUGAR Konsortium

### Einleitung (Übergeordnete Ziele und Projekstruktur)

Das SUGAR-Projekt „Submarine Gashydrat Reservoir“ entwickelt Techno- logien, um Gashydratvorkommen im Meeresboden wirtschaftlich nutzen zu können. Dabei soll zum einen Erdgas aus Gashydraten produziert und zum anderen Kohlendioxid im Meeresboden gespeichert werden. Das Projekt läuft seit dem Jahr 2008 und wird vom GEOMAR Forschungszentrum koor- diniert. Hier soll über die Ergebnisse der zweiten Projektphase berichtet wer- den (SUGAR-II: Sommer 2011 bis 2014).

Erdgas aus unkonventionellen Vorkommen hat in den letzten Jahren den Weltmarkt grundlegend verändert. Nordamerika ist heute nicht mehr auf den Import von Flüssiggas angewiesen, sondern exportiert Kohlenwasserstoffe aus unkonventionellen Quellen in andere Regionen und Erdteile. Methanhy- drate werden weltweit als nächste unkonventionelle Erdgasressource ange- sehen. Insgesamt wurde in den letzten 10 Jahren ca. eine Milliarde US-Dollar für die Erforschung und Erschließung der Gashydrate ausgegeben. Dabei sind besonders die Südostasiatischen Staaten und weitere Länder aus dem pazifischen Raum aktiv (Japan, Südkorea, China, Indien, Taiwan, Neusee- land), da diese Region auf den Import von teurem Flüssiggas angewiesen ist und auf Grund des starken Wirtschaftswachstums einen ständig steigenden Bedarf an Erdgas hat.

Bisher wurde bei vier Feldtests Erdgas aus Gashydratvorkommen produ- ziert. Drei dieser Tests wurden an Land in Permafrost Gebieten (Kanada, Alaska) durchgeführt, die unter dem Eis Gashydrate führen und leichter zu- gänglich sind als der tiefe Meeresboden. Im Jahr 2012 wurde in Prudhoe Bay, Alaska, von Conoco Phillips, dem US-DOE und dem japanischen JOG- MEC demonstriert, dass Methangas durch die Injektion von CO<sub>2</sub> aus Gashy- draten freigesetzt und produziert werden kann. Das CO<sub>2</sub> reagierte dabei spontan mit den Methanhydraten im Untergrund, verdrängte das Methan aus der Gashydratstruktur und wurde selbst als thermodynamisch stabiles Gas- hydrat im Untergrund gespeichert. Die Produktionsraten von Methangas la- gen bei ca. 1000 Nm<sup>3</sup> pro Tag (Nm<sup>3</sup>: Normkubikmeter Gas bei 1 atm Druck).

Der erste offshore Produktionstest wurde im Frühjahr 2013 vom japanischen Gashydratprogramm MH21 im Nankai Trog in ca. 1.000 m Wassertiefe durchgeführt. Der Lagerstättendruck wurde abgesenkt, um die Gashydrate im Meeresboden in freies Erdgas und Wasser zu zersetzen. Das Erdgas wurde anschließend mit einer Rate von ca. 20.000 Nm<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> über eine konventionelle Bohrung gefördert. Nach ca. einer Woche wurde der Test abgebrochen, da Sand in die Bohrung eindrang. Weitere Offshore-Tests sind für Mai 2015 im Ulleung Becken vor Südkorea und für das Jahr 2016 vor Japan angesetzt. Dabei soll über einen längeren Zeitraum von mehreren Wochen bis Monaten Erdgas per Druckentlastung aus Gashydratvorkommen gefördert werden.

Die bisherigen Feldtests bestätigen die Vermutung, dass die Produktionsraten zu gering sind, um bei Einsatz konventioneller Technik wirtschaftlich und gewinnbringend Erdgas aus submarinen Gashydratvorkommen zu fördern. SUGAR zielt daher darauf ab, neue und speziell angepasste Technologien zu entwickeln, mit denen Gashydratlagerstätten wesentlich kostengünstiger als bisher erkundet und erschlossen werden können. Nur auf diesem Weg wird es möglich, Gashydrate als neue unkonventionelle Erdgasquelle zu entwickeln.

Das SUGAR-Projekt war in der 2. Phase in die folgenden Teilprojekte gegliedert:

A1 Lokalisierung und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten

A2 Charakterisierung und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten

A3 Simulation der Gashydratakkumulation im Meeresboden

B1 Simulation des Gashydratabbaus

B2 Optimierung von Verfahren zum Gashydratabbau

B3 Erschließung von Gashydrat-Lagerstätten

An jedem dieser Teilprojekte waren sowohl Firmen als auch Forschungseinrichtungen aus dem akademischen Bereich beteiligt. Das Verbundprojekt wurde von zwei Bundesministerien gemeinsam gefördert (BMWi und BMBF), um einen effektiven Wissens- und Technologietransfer zu gewährleisten.

Das SUGAR-Projekt geht jetzt mit z.T. neuen Partnern und neuer Struktur in die 3. Phase. Nach Abschluss der 3. Phase sollen die Arbeiten auf Europäischer Ebene fortgesetzt und mit einem europäischen Feldtest abgeschlossen werden.

Im Folgenden werden für jedes Teilprojekt die wichtigsten Ergebnisse aus der 2. Projektphase vorgestellt.

## A1 Lokalisierung und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten

Projektpartner: L-3 ELAC Nautik, CONTROS System & Solution GmbH, GEOMAR

In diesem Teilvorhaben wurden hydroakustische Verfahren, Fächerecholote und chemische Sensoren weiterentwickelt, um das Austreten von Gasblasen und gelösten Gasen (Methan: CH<sub>4</sub>, Kohlendioxid: CO<sub>2</sub>) am Meeresboden möglichst effizient und zuverlässig nachweisen zu können. Gashydratvorkommen entstehen in der Regel durch Gasmigration im Untergrund. In einigen Fällen wird ein geringer Gasanteil nicht in Gashydraten fixiert sondern am Meeresboden freigesetzt. Wenn also am tiefen Meeresboden (>400 m Wassertiefe) Gasblasen austreten, kann davon ausgegangen werden, dass dort im Untergrund Gashydrate anzutreffen sind. Bei der Produktion von Erdgas aus Gashydraten muss verhindert werden, dass größere Mengen an Erdgas und CO<sub>2</sub> am Meeresboden entweichen. Diese Leckagen können ebenfalls mit Hilfe hydroakustischer Verfahren und chemischer Sensoren nachgewiesen werden. Fächerecholote und Sensoren sind also bestens geeignet, um Gashydratvorkommen zu lokalisieren und die Förderung zu überwachen.

Im Rahmen von SUGAR-II wurden die folgenden konkreten Ergebnisse erzielt:

- Deutliche Verbesserung und Miniaturisierung von chemischen Sensoren der Firma CONTROS zum Nachweis von gelöstem CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> bei Einsatz auf geschleppten Trägersystemen
- Verbesserung der Signalgebung und Registrierung in Fächerecholoten der Firma L-3 ELAC Nautik
- Entwicklung von mobilen Fächerecholoten für den flexiblen offshore Einsatz
- Effiziente Speicherung von 3-D und 4-D Wassersäulendaten
- Nutzerfreundliche Visualisierung der Daten
- Automatische Erkennung von Gasblasen und Unterscheidung von anderen Objekten in der Wassersäule

Insgesamt wurde auf diesem Weg die Detektion von gelösten Gasen (CONTROS Sensoren) und Gasblasen mit den SeaBeam-Fächerecholoten der Firma L-3 ELAC Nautik wesentlich verbessert und effizienter gestaltet. GEOMAR hat die Algorithmen zur Erkennung von Gasblasen beigetragen und die von ELAC und CONTROS neu entwickelten Geräte und Verfahren gemeinsam mit den Firmen auf Forschungsschiffen erfolgreich im Feld getestet (u.a. FS Littorina in der Kieler Bucht, FS Polaris und FS Sonne vor Neuseeland, FS Poseidon im Mittelmeer).

## **A2 Charakterisierung und Überwachung von Gashydrat-Lagerstätten**

Projektpartner: TEEC Geophysics, BGR, MARUM, GEOMAR,

Im Teilvorhaben A2 wurden speziell angepasste seismische und elektromagnetische Verfahren entwickelt und optimiert, um die Verteilung von Gashydraten im Meeresboden erfassen und abbilden zu können. Diese Verfahren dienen vor allem der Charakterisierung von Gashydratvorkommen; sie können aber auch eingesetzt werden, um die Gashydratzersetzung im Untergrund bei der Erdgasproduktion zu überwachen. Die aus der Erdöl/Erdgas-Exploration bekannten Geräte sind sehr teuer in der Anschaffung und im Betrieb und für Zieltiefen von mehreren Kilometern (km) unterhalb des Meeresbodens ausgelegt. Sie sind für die Erkundung von Gashydraten ungeeignet, da diese in wesentlich geringeren Sedimenttiefen vorkommen (meist <0.5 km unter dem Meeresboden). GEOMAR und BGR haben daher in den zurückliegenden Jahren Geräte entwickelt, mit denen die oberen 0.5 - 1 km des Meeresbodens hochauflösend vermessen werden können (P-Cable Seismik, tiefgeschleppte Seismik, CSEM für 2-D und 3-D Vermessungen, kontinuierliche Verbesserung der OBS/OBH-Techniken). Da diese Geräte klein, mobil und günstig im Betrieb und in der Anschaffung sind, tragen sie dazu bei, die Kosten für die Erkundung von Gashydratvorkommen drastisch zu reduzieren. Im Rahmen von SUGAR-II wurden neue Verfahren entwickelt, um die Auswertung der Daten zu verbessern. Dabei haben die Projektpartner die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Verbesserung der Auswertung von 3-D seismischen Daten zur hochauflösenden Abbildung von Strukturen im Untergrund (De-ghosting von P-Cable-Daten, TEEC)
- Auswertung der seismischen Geschwindigkeiten zur Abschätzung von Gashydratmengen im Untergrund (OBS/OBH Einsätze, GEOMAR)
- Optimierung der Auswertung von 2-D elektromagnetischen Profilen zur Abschätzung der Gashydratverteilung im Untergrund (BGR, CSEM)

- Neue Verfahren zur Auswertung von 3-D elektromagnetischen Daten zur Abschätzung der Gashydratverteilung im Untergrund (GEOMAR, CSEM Tomographie).
- Innovative Ansätze zur gemeinsamen Auswertung von 3D seismischen und elektromagnetischen Daten zur Quantifizierung von Gashydratmengen im Untergrund (Joint Inversion, GEOMAR)

Zudem wurden die Geräte im Feld getestet und eingesetzt, um die Gashydratvorkommen in den folgenden Gebieten zu untersuchen:

- Storrega-Rutschung vor Norwegen (FS Meteor, M87-2, OBS, P-Cable, CSEM)
- Kontinentalhang von Taiwan (FS Sonne, SO217, P-Cable, OBS, CSEM)
- Seep-Systeme vor Neuseeland (FS Sonne, SO214, SO226, P-Cable, OBS, CSEM, Geochemie)
- Donau-Tiefseefächer im Schwarzen Meer vor Rumänien und Bulgarien (FS Merian, MSM34, MSM35, 2-D Seismik, P-Cable, OBS, CSEM, Geochemie)

Die Untersuchungen vor Taiwan und im Schwarzen Meer waren besonders erfolgreich. Sie zeigten, dass es dort Gashydratvorkommen in sandigen Sedimenten gibt, die wahrscheinlich für die Erdgasproduktion geeignet sind. Diese Gebiete sollen in zukünftigen Ausfahrten genauer untersucht werden. Dabei soll das mobile Bohrgerät MeBo eingesetzt werden (s. Teilprojekt B3), um die Interpretation der geophysikalischen Daten zu validieren und Gashydratproben zu bergen. MARUM baute dafür neue Geräte zur Bergung und Beprobung von Gashydraten unter in-situ Druckbedingungen, die auf einer Deutsch-Französischen Ausfahrt im Atlantik vor Westafrika mit MeBo eingesetzt wurden.

Der Donau-Tiefseefächer vor Bulgarien und Rumänien könnte als Lokation für einen europäischen Feldtest zur Erdgasproduktion aus Gashydraten dienen und wird daher in SUGAR-III intensiv untersucht.



### A3 Simulation der Gashydratakkumulation im Meeresboden

Projektpartner: GEOMAR

Kooperationspartner: IES-Schlumberger

Im Teilprojekt A3 wurde das Beckenmodell PetroMod der Aachener Firma IES-Schlumberger weiterentwickelt und angewendet, um die Entstehung von Gashydrat-Lagerstätten numerisch zu simulieren und die räumliche Verteilung von Gashydrat-Vorkommen auf Basis geologischer und geophysikalischer Daten vorherzusagen. Diese Art der Beckenmodellierung ist in der Erdöl- und Erdgasindustrie weit verbreitet. Sie wird eingesetzt, um die Anzahl von kostenintensiven Erkundungsbohrungen zu minimieren und damit die Explorationskosten zu verringern. Das von IES-Schlumberger angebotene PetroMod-Paket hat sich dabei in den letzten Jahren zum industriellen Standard entwickelt. Im Rahmen von SUGAR-I wurde dieses Modell erweitert, um erstmals die Gashydratentstehung bei der Beckenbildung zu simulieren. IES-Schlumberger verfügt damit über ein weltweit einzigartiges Produkt, das zurzeit eine Vielzahl neuer Kunden anzieht. In SUGAR-II wurde dieses Modell von GEOMAR angewendet, um auf Basis detaillierter geologischer Modell die Entstehung und Verteilung von Gashydraten in den folgenden Gebieten zu simulieren:

- Alaska North Slope (onshore und offshore, in Kooperation mit USGS und IES-Schlumberger)
- Hydratrücken vor Oregon (in Kooperation mit OSU)
- Golf von Mexiko (mit finanzieller Unterstützung von Statoil)

Bei der Anwendung des Gashydrat-Moduls traten zum Teil Probleme auf, die in Kooperation mit IES-Schlumberger gelöst werden konnten. Diese Problemlösungen führten zu einer deutlichen Verbesserung der Software. Die aktuelle Version, die mittlerweile auf dem Markt ist, kann die Gashydratentstehung deutlich zuverlässiger und robuster berechnen als die erste Version, die in SUGAR-I entwickelt wurde.

Zusätzlich wurde am GEOMAR ein 1-D Transport-Reaktions-Modell entwickelt, das die Gashydratakkumulation im Meeresboden unter vereinfachenden Steady-state-Annahmen simuliert. Dieses Modell wurde auf einem 1 x 1 Grad Gitter für den gesamten Weltozean angewendet, um die Gashydratverteilung am Meeresboden auf globaler Basis zu simulieren. Die Ergebnisse wurden in mehreren Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert. Sie zeigen, dass weltweit etwa 1.000 Giga-

tonnen Methan-Kohlenstoff (Gt C) in marinen Hydraten fixiert sind. Bisher ging man von einer deutlich höheren Menge aus (ca. 10.000 Gt C). Die neue Abschätzung liegt dennoch um eine Größenordnung über der globalen Kohlenstoffmenge in konventionellen Erdgas-Lagerstätten (ca. 100 Gt C). Sie bestätigt also das große Potential der Gashydrate. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein großer Teil der globalen Gashydrat-Vorkommen nicht wirtschaftlich genutzt werden kann. Nur der Anteil, der in sandigen Sedimenten und Lagen vorkommt, ist technisch abbaubar. Die zurzeit noch laufenden Untersuchungen im japanischen und US-amerikanischen Gashydratprogramm lassen vermuten, dass dieser Anteil bei ca. 10 – 50 % liegt. Dazu gehören gashydratführende Turbiditablagerungen, die an vielen Kontinentalrändern vorkommen. Der erfolgreiche japanische Offshore-Produktionstest wurde in solchen aus Sand-Silt-Ton-Sequenzen bestehenden Ablagerungen durchgeführt. Wieviel von dem technisch abbaubaren Anteil wirtschaftlich genutzt werden kann, hängt u.a. von den Technologienentwicklungen im SUGAR-Projekt ab. Je effizienter und kostengünstiger die Exploration, Erschließung und Erdgas-Produktion gestaltet werden können, desto größer wird der wirtschaftlich nutzbare Anteil.

### B1 Simulation des Gashydratabbaus

Projektpartner: Fraunhofer UMSICHT, GFZ, GEOMAR

Kooperationspartner: CMGL, EON Ruhrgas, Wintershall

Im Teilprojekt B1 wurde der Abbau von Gashydraten numerisch simuliert. Reservoir-Modelle wurden entwickelt und eingesetzt, um die Erdgasausbeuten bei verschiedenen Produktionsverfahren auf Reservoir-Skala vorherzusagen und damit die am besten geeigneten Verfahren zu identifizieren.

Unter Führung von Fraunhofer UMSICHT wurde der auf COMSOL Multiphysics Software-Umgebung basierende Gashydratsimulator HYRES weiterentwickelt und getestet. Er wurde gemeinsam mit GFZ und GEOMAR angewendet, um die Ergebnisse der großskaligen Drucklaborexperimente in Teilprojekt B2 auszuwerten. Weiterhin wurden die in B2 entwickelten Prozessformulierungen und mathematischen Gleichungen in den Simulator eingebaut, um realistischere Simulationsergebnisse zu erzielen (shrinking core model, Permeabilitätsveränderung durch Gashydratbildung und -zersetzung, s. B2). Auf diese Weise konnten die Simulationen deutlich verbessert werden.

Um das in-house Modell HYRES und den kommerziellen Simulator CMG STARS an einer konkreten Lokation zu testen, wurde der für Mai 2015 geplante Fördertest im Ulleung Becken vor Korea simuliert. Die Eingangsdaten

für das Modell wurden vom südkoreanischen Gashydratprogramm zur Verfügung gestellt. Die Lokation ist durch eine komplexe Lithologie (Turbidite mit Sand-Silt-Ton-Wechsellagen) und einen extrem hohen geothermischen Gradienten (ca. 100 °C pro km) gekennzeichnet. Der Abbau soll mittels Druckentlastung durchgeführt werden. Die Simulationen sagen für die ersten Wochen und Monate hohe Erdgasproduktionsraten von ca. 400.000 – 500.000 Nm<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> pro Bohrloch voraus. Nach einigen Monaten gingen die berechneten Raten deutlich zurück, weil das Gashydrat im Simulationsgebiet in einem Radius von 500 m um die Förderbohrung weitgehend abgebaut war. Diese Raten sind wesentlich höher als die bisher für andere Lokationen abgeschätzten Raten. Dies ist auf den ungewöhnlich hohen geothermischen Gradienten zurückzuführen, der für eine ausreichende Wärmezufuhr sorgt. Zudem wird die Erdgasproduktion durch die Restwärme in den impermeablen Tonlagen und die Fokussierung der Stoffflüsse auf die gashydratführenden Sandlagen unterstützt.

Schließlich wurde die Wirtschaftlichkeit der Erdgasförderung aus Gashydraten betrachtet. Dazu wurden die aktuellen Marktpreise für Erdgas und CO<sub>2</sub> herangezogen (Stand Sommer 2014) sowie die Kosten für Investitionen und Betrieb (CAPEX, OPEX) für die Förderung und den Transport mittels konventioneller Offshore-Technik abgeschätzt. Diese Rechnungen ergaben, dass pro Bohrung eine mittlere Erdgasförderrate von mehr als 200.000 Nm<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> über einen Zeitraum von ca. 10 Jahren aufrechterhalten werden muss.

Die Simulationen für das Ulleung Becken vor Korea lassen vermuten, dass dort eine kommerzielle Nutzung der Gashydratvorkommen möglich sein könnte. Der anstehende Feldtest wird zeigen, ob die Modellvorhersagen zutreffen. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die hohen Förderraten pro Bohrloch nur für deutlich weniger als 10 Jahre aufrechterhalten werden können. Auch für dieses geologisch sehr günstige Gebiet ist es daher notwendig, neue Fördertechniken zu entwickeln, um die Kosten zu minimieren.

## **B2 Optimierung von Verfahren zum Gashydratabbau**

Projektpartner: CONTROS System & Solution GmbH, Fraunhofer UM-SICHT, GFZ, GEOMAR, GZG

Kooperationspartner und Sponsoring: RWE Dea, BASF

Im Teilprojekt B2 wurden Laborexperimente unter in-situ Druck- und Temperatur-Bedingungen durchgeführt, um neue Verfahren für die Erdgasgewinnung aus Gashydraten zu entwickeln und zu bewerten. Dabei wurden Experimente zur Untersuchung der Effekte auf mikroskopischer, also auf

molekularer und Porenskala, sowie auf makroskopischer Skala bis zu ca. 200 L Volumen durchgeführt. Der Abbau von natürlichem Gashydrat durch Injektion von CO<sub>2</sub> stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, das darin gebundene Methangas als eine insgesamt CO<sub>2</sub>-neutrale Energiequelle zu erschließen. Die Methangewinnung bei gleichzeitiger CO<sub>2</sub>-Deponierung ist daher – aus Klimaperspektive – anderen Hydrat-Abbaumethoden vorzuziehen.

An der Universität Göttingen (GZG) wurde der CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-Gasaustausch an synthetischen Methanhydraten auf mikroskopischer Ebene untersucht, um die Austauschmechanismen besser zu verstehen. Dabei wurde festgestellt, dass der Austausch an einer Front stattfindet, die kontinuierlich von der Oberfläche der Kristallite in deren Zentrum vordringt. Der innere Methanhydratkern schrumpft also über die Zeit und wird durch CO<sub>2</sub>-Hydrat ersetzt („shrinking core model“). Durch die wandernde Reaktionsfront hindurch finden Diffusionsprozesse statt, bei denen CO<sub>2</sub>-Moleküle über Fehlstellen in die Methanhydratstruktur eindringen und CH<sub>4</sub>-Moleküle aus dem Kristallit heraus diffundieren. Die CH<sub>4</sub>-Diffusion ist ca. 3-4 Mal langsamer als die CO<sub>2</sub>-Diffusion und ist daher der geschwindigkeitsbestimmende Prozess. Die Umwandlungsgeschwindigkeit klingt mit der Zeit ab, da die Methanhydrate von einer wachsenden CO<sub>2</sub>-Hydratschicht ummantelt werden, die den diffusiven Abtransport von CH<sub>4</sub> verlangsamt. Es wurde ein numerisches Modell entwickelt, mit dem diese Prozesse simuliert werden können und das in der Lage ist, alle experimentellen Daten zu erklären. Diese Ergebnisse wurden in zahlreichen Veröffentlichungen in führenden internationalen Fachzeitschriften dokumentiert. Weiterhin wurde experimentell festgestellt, dass der initiale Gasaustausch durch die Zugabe von Polymeren, die Firma BASF zur Verfügung stellte, beschleunigt werden kann. Im weiteren Verlauf der Reaktion bremsen die Polymere jedoch die Austauschraten, so dass sie für einen technischen Einsatz bei der Erdgasproduktion mittels CO<sub>2</sub>-Injektion wahrscheinlich wenig geeignet sind.

Am GEOMAR wurden ebenfalls Umwandlungsexperimente durchgeführt, allerdings mit deutlich größeren Volumina als am GZG. Zudem wurde ein vereinfachtes analytisches Modell des „shrinking core model“ entwickelt. Erfreulicherweise konnten die makroskopischen Laborbeobachtungen mit diesem auf analytischen Lösungen beruhenden mathematischen Modell gut erklärt werden. Damit ist es jetzt möglich, den CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-Gasaustausch auch auf Reservoir Skala mechanistisch zutreffend und prozessorientiert zu simulieren und belastbare Aussagen über die Erdgas-Förderraten zu machen. Weiterhin wurde am GEOMAR der Einfluss der Gashydratbildung auf die Permeabilität des Reservoirgesteins experimentell untersucht. Auch hier wurden Gleichungen gefunden, mit denen die Labordaten erklärt werden und die bei der Reservoirsimulation verwendet werden können, um verbesserte Abschätzungen der Erdgasförderraten zu erzielen (s. Teilprojekt B1).

Am GFZ wurde das großvolumige Drucklaborsystem LARS (200 L) mit tomographischen Sensoren ausgerüstet. Damit konnte die 3-D-Verteilung von Gashydraten im Druckgefäß bei Umwandlungsexperimenten verfolgt werden, was zu einer wesentlichen Verbesserung der Dateninterpretation führte. Zudem wurde der Bohrlochreaktor zur in-situ Verbrennung von Methan weiterentwickelt und erfolgreich in der KTB-Bohrung Windischeschenbach getestet. Mit dieser Neuentwicklung steht jetzt ein Werkzeug zur Verfügung, um Bohrlöcher mit Erdgas zu beheizen und damit z. B. die Bildung von sekundären Gashydraten in der Förderbohrung zu verhindern oder flüssiges CO<sub>2</sub> in der Injektionsbohrung vor dem Eintritt in das Reservoir zu erhitzen.

Contros System & Solution GmbH rüstete die Drucklabore am GEOMAR und GFZ mit speziell angepassten Sensorpaketen aus (Druck, Temperatur, Methan, CO<sub>2</sub>) und entwickelte die dazugehörige Software zur Steuerung und Datenaufnahme.

Fraunhofer UMSICHT untersuchte die Bildungskinetik und Stabilität von Mischhydraten und bewertete verschiedene Ansätze zur Sandseparation bezüglich ihrer Eignung für die Erdgasproduktion aus Gashydraten.

### **B3 Erschließung von Gashydratlagerstätten**

Projektpartner: Bauer Maschinen, Aker Solutions, TU Clausthal (ITE), TU-BA Freiberg, GZ Bochum

Kooperationspartner: Wintershall

In Teilprojekt B3 wurden neue Bohrtechnologien für die Erschließung von Gashydratlagerstätten entwickelt. Dafür mussten die Technologien an die spezifischen Gashydrat-Bedingungen angepasst werden (hohe Wassertiefe, geringe Sedimenttiefe, wenig verfestigte Sedimente, temperatur- und druckempfindliche Feststoffe). Zudem sollte nach Wegen gesucht werden, die Erschließungskosten gegenüber dem Einsatz konventioneller Offshore-Technik deutlich zu reduzieren.

Aufbauend auf den Stand der Technik bei der konventionellen Offshore Erdöl/Erdgas-Produktion bewertete TU Clausthal verschiedene Abbaukonzepte und Techniken für die Bohrungsherstellung/Bohrlochkonstruktion auf ihre Eignung bezüglich der Erdgasproduktion aus Gashydratvorkommen. TU Clausthal entwickelte zudem einen speziell angepassten Niedrig-Energie-Bohrmeißel.

TUBA Freiberg untersuchte verschiedene Bohrlochspülungen und identifi-

zierte eine geeignete Bohrspülung auf Basis von Äthylen-Glykol, mit der sowohl die sekundäre Gashydratbildung als auch die Dissoziation primärer Gashydrate im Bohrloch verhindert werden. Zudem wurden vorhandene „Welltest“-Modelle erweitert, um die Gashydratzersetzung um das Bohrloch simulieren zu können. Diese stark vereinfachenden analytischen 1-D-Modelle sind eine sinnvolle Ergänzung zur numerischen 3-D Reservoirsimulation in Teilprojekt B1, da sie eine schnelle Interpretation von Messergebnissen aus Druck- und Pumptesten am Bohrloch ermöglichen.

GZ Bochum untersuchte die Eignung von Coil-Tubing-Techniken für die Erstellung einer Produktionsbohrung und für den Gastransport vom Bohrloch zum Schiff (Riser). GZB konzipierte dazu eine tauchfähige Einheit (SCTU: Subsea Coiled Tubing Unit), die am Meeresboden abgesetzt wird und dort die Produktionsbohrung erstellt. Für den Riser wurde ein neues Konzept auf Basis von hochflexiblem und mechanisch stabilem ACM (Advanced Composite Material) entwickelt, um den Medientransport zwischen der Bohrvorrichtung am Meeresboden und einer beliebigen schwimmenden Einheit zu ermöglichen.

Unter Koordination von TU Clausthal entwickelten alle B3-Partner gemeinsam ein erstes technisches Grobkonzept für einen europäischen Fördertest im Donautiefseefächer, der im Anschluss von SUGAR-III durchgeführt werden soll: Auf einer Betonplattform am Meeresboden werden Pumpen und weitere Einheiten installiert. Im Zentrum der Plattform ist ein Standrohr angebracht, dass in den Meeresboden eindringt. Auf das Standrohr wird ein mobiles Bohrgerät abgesetzt, dass die Produktionsbohrung erstellt. Das Bohrgerät wird anschließend entfernt und die Bohrung wird mit einem BOP (Blow-out preventer) versehen. Die Pumpe pumpt Wasser aus der Bohrung über den Riser zur Oberfläche bis die Gashydrate im Untergrund durch den resultierenden Druckabfall zerfallen. Anschließend wird das entstehende Erdgas gemeinsam mit dem Restwasser produziert und per Riser zur Oberfläche transportiert.

Firma Bauer prüfte, ob ihr im Jahr 2014 gebautes Bohrgerät MeBo200 für die Erstellung einer Produktionsbohrung geeignet ist. Dabei stellte sich heraus, dass der Umbau dieses mobilen Explorationsbohrgeräts zu einem Gerät zur Erstellung von Produktionsbohrungen nicht möglich ist. Bauer entwickelte daraufhin ein erstes Konzept für ein MeBo500, das in Wassertiefen von bis zu 4000 m Produktionsbohrungen bis zu einer Sedimenttiefe von ca. 500 m erstellen kann. Dieses mobile Gerät wird auf dem Meeresboden bzw. der geplanten Plattform abgesetzt (s.o.) und könnte eingesetzt werden, um die Produktionsbohrung für den geplanten europäischen Feldtest zu erstellen.

## Wissens- und Technologietransfer

Im SUGAR-Konsortium hat sich eine enge Kooperation zwischen den beteiligten Firmen und akademischen Partnern entwickelt, auf deren Grundlage ein intensiver Wissens- und Technologietransfer stattfindet. Sowohl der akademische Sektor als auch die Firmen profitieren von diesem Austausch. Der Technologietransfer hat in vielen Fällen zu einer deutlichen Verbesserung von Produkten und Stärkung der Firmen geführt. Als Beispiel seien hier die folgenden Entwicklungen genannt:

- Die von GEOMAR entwickelten Algorithmen zur automatischen Objekterkennung haben die Einsatzmöglichkeiten der SeaBeam-Fächerecholote der Firma L-3 ELAC Nautik deutlich erweitert.
- Das von GEOMAR entwickelte Modul zur Simulation der Gashydratbildung hat das Softwarepaket PetroMod der Firma IES Schlumberger signifikant gestärkt.
- Die seegängigen Geräte der Firmen CONTROS und ELAC wurden auf zahlreichen Ausfahrten mit Forschungsschiffen erfolgreich getestet, die von den akademischen Partnern MARUM, GEOMAR und BGR durchgeführt wurden.

Andererseits haben die akademischen Partner stark von der Expertise der Firmen profitiert:

- Mit Hilfe der Deghosting-Techniken der Firma TEEC wurde die Auswertung der von GEOMAR mit dem P-Cable-Gerät gewonnenen seismischen Daten deutlich verbessert.
- Die von Firma Contros entwickelten Sensorkomplexe haben die Einsatzmöglichkeiten der Drucklabore am GFZ und am GEOMAR erweitert.
- Das Knowhow der Firmen aus dem Erdöl/Erdgas-Bereich (RWE Dea, Wintershall, EON Ruhrgas) hat die Konzepte zur Förder- und Abscheide-technik von TU Clausthal, TUBA Freiberg und GZ Bochum und die Abschätzung der Förderkosten durch Fraunhofer UMSICHT deutlich verbessert.

## Internationale Kooperation

Die internationale Gashydratforschung ist stark auf den südostasiatischen Raum fokussiert. SUGAR kooperiert daher eng mit den nationalen Gashydratprojekten in Japan, Südkorea, Indien, China, Taiwan und Neuseeland. In

der zweiten SUGAR-Phase wurde dieser Austausch durch gemeinsame Workshops und wechselseitige Besuche weiter intensiviert. Zudem wurden gemeinsame Ausfahrten durchgeführt, um die Gashydratvorkommen vor Taiwan und Neuseeland mit SUGAR-Technologien zu erkunden. Die erfolgreichen Expeditionen ins Schwarze Meer wurden durch einen Workshop in Kiel vorbereitet, an dem ca. 20 Partnerinstitutionen aus dem Schwarzmeerraum teilnahmen. Zu einem weiteren Workshop wurden Partnerinstitutionen aus 10 europäischen Staaten nach Kiel eingeladen, um die Gashydratforschung auf europäischer Ebene besser zu vernetzen und Anträge auf EU-Fördermittel vorzubereiten. Diese europäischen Aktivitäten werden in der jetzt beginnenden 3. SUGAR-Phase weiter intensiviert.

## Wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse

Gashydrate werden bisher nicht wirtschaftlich genutzt. Es gibt also noch keinen Markt für Technologien und Geräte zur Erschließung und Ausbeutung von Gashydraten. Es gibt jedoch ein steigendes Interesse an Gashydraten als zukünftige Erdgasquelle, von dem im SUGAR Konsortium besonders die Firma IES-Schlumberger profitiert. Sie konnte für ihr Software-Paket PetroMod eine Reihe neuer Kunden aus dem Erdöl/Erdgas-Bereich gewinnen, weil sie mit diesem Produkt als einziger Anbieter auf dem Weltmarkt in der Lage ist, die Entstehung von Gashydraten numerisch zu simulieren und ihre Verteilung im Untergrund für gegebene geologische Randbedingungen vorherzusagen (s. Teilprojekt A3). Firma IES-Schlumberger konnte aufgrund der SUGAR-Arbeiten ihren Umsatz signifikant erhöhen.

Die übrigen an SUGAR beteiligten Firmen entwickeln Technologien, die nicht nur für die Nutzung der Gashydratvorkommen relevant sind sondern viele weitere Anwendungsfelder haben. Sie stärken daher mit dem SUGAR-Projekt ihre Position auf den Märkten, auf denen sie heute schon aktiv sind. Gute Beispiele dafür sind:

- ELAC Nautik: Die Fähigkeit mit Hilfe der in SUGAR optimierten Fächerecholote Gasblasen und andere Objekte in der Wassersäule nachzuweisen ist wichtig für den Offshore Öl- und Gasmarkt, für militärische und viele andere zivile Felder auf denen ELAC heute schon stark vertreten ist und durch SUGAR noch erfolgreicher agieren kann.
- CONTROS: Die seegängigen Sensoren, die im Rahmen von SUGAR entwickelt und optimiert wurden, werden im Kernmarkt von CONTROS, bei der maritimen Umweltüberwachung z. B. im Erdgasbereich, stark nachgefragt. CONTROS kann so durch SUGAR seine Marktposition stärken.



- TEEC: Die „Veredelung“ von seismischen Explorationsdaten aus der Erdölindustrie durch eine bessere Auswertung ist das TEEC-Kerngeschäft. Die Expertise und Marktposition von TEEC wird in diesem Bereich durch SUGAR gestärkt.

Weil Gashydrat im Wesentlichen gefrorenes Erdgas ist, können viele der in SUGAR entwickelten Technologien auf dem größten heute existierenden Markt für meeres-technische Produkte, nämlich dem Offshore Erdöl und Erdgasbereich, genutzt und erfolgreich eingesetzt werden.

## SOTLL – Sideways Offshore Transfer of LNG and LPG

Förderkennzeichen: 03SX308

Christian Frohne (Nexans Deutschland GmbH)  
 Christian Reiter (Nexans Deutschland GmbH)  
 Sven Hoog (IMPac Offshore Engineering GmbH, Hamburg)  
 Johannes Myland (IMPac Offshore Engineering GmbH, Hamburg)  
 Joern Homann (Brugg Rohrsysteme, Wunstorf)  
 Oliver Herbst (Brugg Rohrsysteme, Wunstorf)  
 Günther Clauss (Technische Universität, Berlin)  
 Sven Stuppe (Technische Universität, Berlin)  
 Matthias Dudek (Technische Universität, Berlin)

### Zusammenfassung

Im Rahmen des SOTLL – Projektes ist es dem Projektkonsortium gelungen, ein System zur Offshore-Verladung flüssiger Gase (LNG und LPG) zu entwickeln, das den Einsatz in typischen Seebedingungen mit einer signifikanten Wellenhöhe bis zu 3m erlaubt, ohne besondere Anforderungen an die verbundene Tankerflotte zu stellen. Dies wurde erreicht, indem – anders als bei der sonst angestrebten Verladung in Tandem-Konfiguration – die Leitungen der in side-by-side Positionierung befindlichen Schiffe zum standardmäßig vorhandenen Mittschiff – Anschluss bei LNG (LPG) Tankern verbunden werden. Die erhöhten Anforderungen dieser Positionierung in Kombination mit einer speziellen Leitungsführung konnten von der ebenfalls im Projektverlauf entwickelten, hochflexiblen vakuumisolierten Transferleitung erfüllt werden. Intensive numerische Simulationen der Schiffs- und Leitungsbewegungen haben die Einsatzgrenzen aufgezeigt. Eine von allen Projektpartnern gemeinsam erstellte Analyse möglicher Versagensszenarien hat ergeben, dass die Verladung von LNG (LPG) auf diese Weise auch offshore in side-by-side Positionierung möglich ist.

### Abstract

The objective of the R&D project SOTLL was the development of an offshore LNG and LPG transfer system, where the two vessels are in side-by-side (SbS) position. The system has no operational limits up to significant wave height of 3m. The objective was to use the standard mid ship manifold as specified for all LNG and LPG carrier. This differentiates this system from the systems working in tandem configuration. This was achieved by an innovative solution using the high flexible, vacuum insulated metal hoses as develo-

ped in this project, in combination with a smart control of the pipe alignment during loading. Intensive numerical analyses of the motions have identified the operational limits of the system well beyond the defined base case. A failure mode effect analysis performed in workshops with participants from all project partners has shown, that the feasibility of the system is secured.

## Einführung

Die Transportmöglichkeiten von Gas sind aufgrund der geringen Energiedichte (Energie pro Energieträgervolumen) stark eingeschränkt. Dies führt zu zum Teil erheblicher Ineffizienz der Nutzung der Rohstoffe – so wird oft – insbesondere im Offshore-Bereich – das im Rahmen der Ölförderung auftretende Begleitgas abgefackelt oder in die Lagerstätte zurückgedrückt.

Transportmöglichkeiten bestehen lediglich durch Pipelines, deren Installationskosten die wirtschaftlich sinnvolle Nutzung auf einen gewissen Umkreis um die Förderung herum begrenzt, durch die cryogene Verflüssigung des Gases und den nachfolgenden Transport in speziellen Tankschiffen, oder durch die Komprimierung auf sehr hohe Drücke und den nachfolgenden Transport der Druckbehälter. Die Technologie der cryogenen Verflüssigung ist für Fördereinrichtungen etabliert, bei denen die Verflüssigung in Landanlagen erfolgen kann. Die Verladung der cryogenen Flüssigkeit LNG (Liquefied Natural Gas) erfolgt dabei durch Gelenkarme, ähnlich wie sie auch bei Öl- oder Chemikalienverladung genutzt werden.

In den letzten Jahren trat die Verflüssigung von Erdgas auch in Offshore-Einrichtungen in den Mittelpunkt des Interesses. Dies ist zum einen durch den gestiegenen Gaspreis insbesondere für den Markt im asiatischen Raum, zum anderen aber auch durch das Interesse an der effizienteren Nutzung der Rohstoffe begründet.

Die Verladung des LNGs von den schwimmenden Produktionseinheiten auf die Tankschiffe ist dabei eines der Technologiefelder, in denen innovative Lösungen gefordert sind, da sich die Verladeeinrichtungen der Landanlagen nicht direkt auf die Offshore-Einrichtungen übertragen lassen.

Im Vorgängerprojekt MPLS20 (gefördert durch das BMWi unter 03SX240) wurde eine Verladeeinrichtung entwickelt, die für besonders schwierige Seegebiete eine ideale Lösung darstellt. Die dazu notwendigen Umbaumaßnahmen an den Tankschiffen, die das LNG transportieren, macht das System aber nur bedingt kosteneffizient für kleinere Projekte, die keine eigene zugeordnete Tankerflotte beinhalten, und die ggf. in weniger schwierigen Seebedingungen operieren. Für solche Projekte ist eine side-by-side Anordnung

der Schiffe vorzuziehen, da in diesem Fall die an jedem Tankschiff vorhandene Anschlussstelle in der Mitte der Längsseiten genutzt werden kann.

Im Projekt haben die Partner Nexans Deutschland und Brugg Rohrsysteme an der Entwicklung der Transferleitung, IMPaC an der Systementwicklung und die TU Berlin an der Simulation der Schiffsbewegungen mitgearbeitet. Das Projekt, gefördert durch das BMWi unter 03SX314, lief von 9/2011 bis 6/2014.

## Entwicklung des Offshore-Verladesystems

Im Projekt SOTLL wurde ein Einsatzszenario definiert, bei dem die LNG (LPG) Produktion auf einem drehbar verankerten Terminal (dem FLNG) erfolgt. Das FLNG wurde exemplarisch sowohl als Großbarge als auch mit konventioneller Schiffshülle ausgelegt, um unterschiedliche Konzepte und Effekte erfassen zu können. Die 12-Punkt-Verankerung des FLNG setzt sich aus viermal drei Kette/Leine/Kette-Strukturen zusammen; die Wassertiefe wurde bei SOTLL auf 100 m festgelegt. Die gewählte Konfiguration erlaubt es dem gekoppelten System aus Terminal und Shuttle-Tanker, sich in 360 Grad um die Verankerung zu drehen, um die jeweilige Gleichgewichtsposition zur resultierenden Gesamtbelastung aus Wind, Welle und Strömung einzunehmen. Die Gleichgewichtsposition resultiert aus dem Widerstand, den die beiden temporär verbundenen Schiffe den Umwelteinflüssen entgegenstellen, weshalb sie durch eine angepasste Festmachposition des Shuttle-Tankers am Terminal, also einem geänderten Gesamtwiderstand des Systems, beeinflusst werden kann. Dies macht sich das SOTLL Konzept durch eine flexibel festzulegende Verankerungsposition inkl. Fenderung und flexibel positionierbarer Ladungstransfertechnik zunutze (Abb. 1).



Abb. 1: Das SOTLL Flüssiggastransfersystem in Erwartung des Shuttle-Tankers

Werden die Positionen günstig gewählt, so lässt sich im Ergebnis eine signifikante Reduzierung der Relativbewegungen zwischen den beiden Schiffen erreichen, sodass die Einsetzbarkeit (Uptime) des Übergabesystems gegenüber existierenden Systemen deutlich erhöht wird. Hinzu kommt der Grundgedanke, dass die Relativbewegungen durch eine größere Spaltbreite zwischen den verankerten Schiffen ebenfalls positiv beeinflusst werden können, was im SOTLL Konzept durch neu konzipierte Fenderpakete ermöglicht wurde. Die umfangreichen Analysen (bei IMPaC und der TU Berlin) und Tests (bei der TU Berlin) konnten diesen Gedanken voll bestätigen.

Das SOTLL Konzept ermöglicht die sichere Durchführung und weitgehende Kontrolle aller auftretenden Einsatzphasen:

- die von Schleppern assistierte Annäherung,
- den durch Winden kontrollierten Einzug des Tankers bis zum Erreichen der seitlichen (zum FLNG parallelen) Verladeposition,
- das Aufstoppen des Tankers genau an der Verladeposition,
- die automatisierte Übergabe und Verriegelung der flexiblen Transferleitungen,
- den mehrstündigen Ladungstransfer
- die anschließende zuverlässige Entleerung, Spülung und Entriegelung der Leitungen vor Trennung der Schiffe im Regelfall bzw.
- die sichere Trennung der noch vollen Leitungen im Notfall (ESD).

Durch eine teleskopierbare Aufhängung (Traverse) der Kupplungen sind sowohl LNG als auch LPG Tankerflanschkonfigurationen bedienbar. Das Konzept erlaubt es, alle Leitungen in allen Phasen vollständig über Wasser zu führen, was zusammen mit der Verwendung von Standardkupplungen (QCDC und ERC) eine Reduktion der Entwicklungs- und Beschaffungskosten für das SOTLL -System bzw. seiner Einzelkomponenten im Vergleich zu anderen Konzepten für mittlere Seebedingungen bei gleicher Verfügbarkeit bedeutet.

### Hydrodynamische Systemanalyse

Die hydrodynamischen Analysen der seitlich vertäuten Schiffe wurden am Bereich Meerestechnik der TU Berlin numerisch sowie mit Modellversuchen

durchgeführt. Um die vielseitige Einsatzfähigkeit des SOTLL-Systems zu dokumentieren, wurden drei Beispielszenarien – Terminal Barge (Länge L=360m) zu LNG Carrier (L=282 m), Ship Shaped Terminal (L=282m) zu LNG Carrier (L=282m) und Ship-Shaped Terminal (L=282m) zu LNG/LPG Feeder (L=174m) – eingehend untersucht. Ziel war es, die unterschiedlichen Mehrkörpersysteme im Seegang so zueinander zu positionieren, dass die Relativbewegungen im Bereich der Kopplungsflansche des Verladesystems minimiert werden. Um für jede Schiffskonfiguration die günstigste Anordnung zu ermitteln, wurden zunächst in Modellversuchen im Maßstab 1:100 die Turret-Position, die Längsposition der Schiffe zueinander und die Spaltbreite zwischen den Schiffen systematisch variiert. Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung der verschiedenen Anordnungen für die Konfiguration Mega Barge zu LNG Carrier.



Abb. 2: Turret- (T1 – T4) und Mooringvariationen ( $dx=+20m - 100m$ ) für das Barge/LNGC-Szenario

Die Untersuchungen der verschiedenen Turret-Positionen haben gezeigt, dass diese keinen signifikanten Einfluss auf die Relativbewegungen der Schiffe zueinander haben. Abschirmeffekte zu den Wellen, die vor allem bei der exzentrischen Turret-Position T2 zu erwarten sind, werden durch Fishtailing Bewegungen des Gesamtsystems minimiert. Für die Konfiguration Terminal Barge zu LNG Carrier hat sich die Längsposition  $dx = -50m$  (gemessen am Hauptspant der Schiffe) bei einer maximalen Spaltbreite von 10m als günstigste Anordnung erwiesen.

Neben der Analyse variabler Transferpositionen der beteiligten Strukturen wurden weitere, transferkritische Aspekte untersucht.

- Es wurden Spalteffekte analysiert, die eine drastische Überhöhung des einlaufenden Wellenfeldes und somit Einfluss auf die Relativbewegungen des Transfersystems zur Folge haben. Mit Fokus auf die Überhöhung der Wellen im Spalt konnten diese Effekte sowohl potentialtheoretisch als auch mittels CFD-Methoden berechnet und durch Modellversuche validiert werden (siehe Abb. 3).

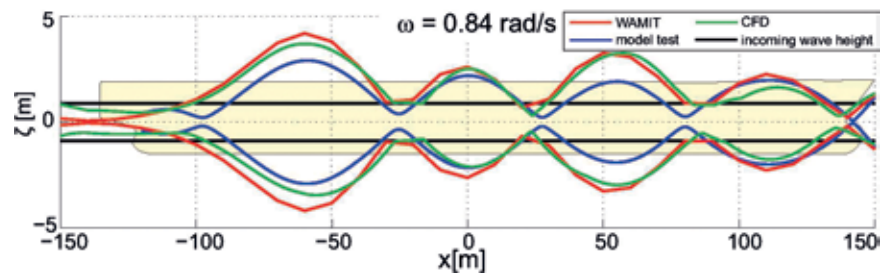


Abb. 3: Darstellung der Einhüllenden des amplifizierten Wellenfeldes im Spalt für  $\omega=0,84\text{rad/s}$  und 10m Spaltbreite

- Desweiteren wurde der Einfluss teilgefüllter Tanks während des Transfervorgangs der Schiffe untersucht. Dazu wurden die füllstandsabhängig veränderten Bewegungsübertragungsfunktionen potentialtheoretisch ermittelt. Zusätzlich wurden ausgewählte Füllstände mittels CFD-Methoden untersucht, um nichtlineare Effekte, wie z. B. Reibung, Swirling Sloshing etc. zu erfassen. Insgesamt konnten die veränderten Resonanzstellen mit beiden numerischen Methoden gut ermittelt und im Anschluss experimentell validiert werden (siehe Abb. 4).

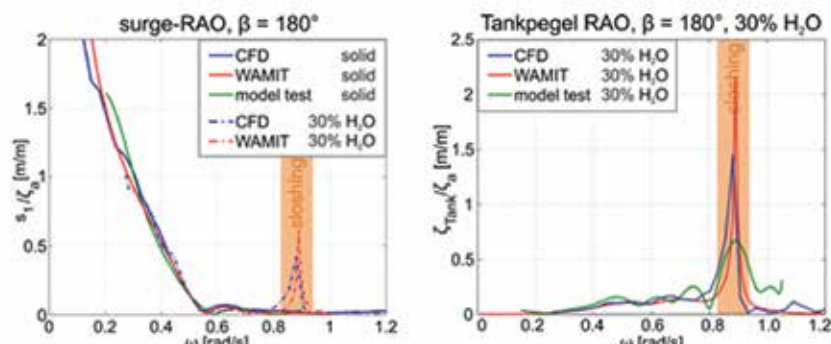


Abb. 4: Exemplarische Darstellung der surge-RAO des LNGC (links), mit und ohne Sloshing-Einfluss, im Zusammenhang mit den Tankpegel-RAOs (rechts), jeweils für 30% Füllhöhe (Wasser)

Unter Berücksichtigung aller o.g. Aspekte konnte mittels Downtime-Analyse eine durchschnittliche Einsatzfähigkeit von 87,1%/anno für mehrere mögliche Einsatzlokalationen weltweit erreicht werden. Auch in schwierigeren Seegebieten, außerhalb des angestrebten Operationsbereiches ( $1,5\text{m} < HS < 3\text{m}$ ), wie z. B. in der Nordsee, bietet das System mit 64,1% eine hohe Verfügbarkeit.

## Einsatzgrenzen des Gesamtsystems

Im Zuge der dynamischen Analysen wurde sowohl der Einfluss der Spaltbreite zwischen den beiden Schiffen als auch der Einfluss der Längsposition der Verankerung der Shuttle-Tanker zum FLNG auf die Bewegungseigenschaften untersucht. Hier zeigte sich, dass der bei herkömmlichen SbS-Konfigurationen genutzte maximale Abstand von 4,5m zwischen den Schiffen, der aus dem maximal erhältlichen Durchmesser der Yokohama Pneumatic-Fender resultiert, nicht die günstigsten (=geringsten) Relativbewegungen zwischen den beiden Schiffen bewirkt. Eine größere Spaltbreite ergibt hier Vorteile. Auch ergibt eine nach Achtern versetzte Ankerposition der Tanker weitere Vorteile in Bezug auf die Relativbewegungen. Im Detail zeigt sich, dass die Verankerungslage tatsächlich einen wichtigen Einfluss auf die Relativbewegungen der gekoppelten Schiffe im Seegang hat - die Längsposition ist dabei jedoch mit einer Reduzierung der Relativbewegungen um bis zu 68 % wesentlich relevanter als die Spaltbreite. Einen nur geringen Effekt in diesem Bezug erbrachte dagegen die Variation der Turretposition, also des Verankerungspunktes des Terminals am Seeboden. Die ermittelten dynamischen „Aufenthaltsräume“ der Manifolds bzw. Leitungsenden ergaben die Längen und die Biegelinien der Wellrohre, die entsprechend vom Projektpartner Brugg entwickelt wurden.

## Risikoanalyse und Notfallszenarien

Neben den regulären Lasten aus der Nutzung im Seegang wurden auch Notfälle und das Systemrisiko analysiert, welches sich z. B. aus einer Leckage bei unterschiedlichen Umwelteinflüssen (Wind) oder dem Bruch einzelner oder auch von Paketen von Ankerleinen zwischen den Schiffen ergibt. Die Ergebnisse für letzteres Problem zeigen ein ausgesprochen gutmütiges Verhalten der Schiffe, was sich in einer sehr langsamen Abdrift der Tanker aus der Ankerposition ergibt: Es bleibt genügend Zeit, um die ESD Prozeduren inkl. Notfalltrennung der Transferleitungen sicher durchzuführen.

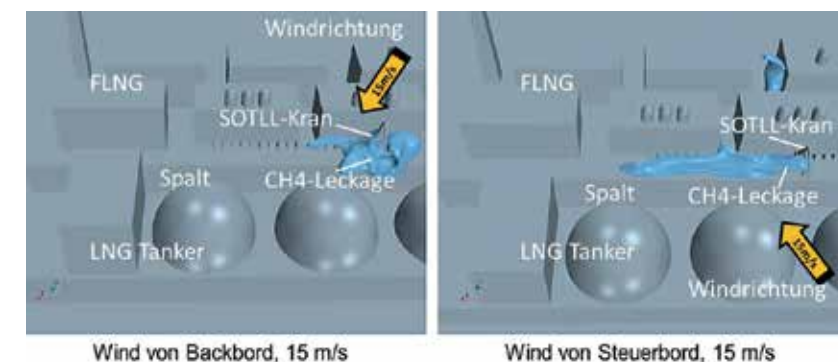


Abb. 5: CFD Analyse der Gasausbreitung nach einer Leckage (Standbilder aus den Visualisierungen)



Als Fazit der Systementwicklungen und einer mehrstufigen Risikoanalyse kann festgehalten werden, dass die SOTLL Verladekonfigurationen sich im regulären Ladungstransferfall als auch im Notfall (Versagen von Ankerleinen) als gutmütig in Bezug auf die resultierenden Relativbewegungen der Schiffe und die Leinenkräfte bei allen betrachteten Seebedingungen erwiesen haben. Die zugrundegelegten Prozeduren sind für die Praxis geeignet und die ermittelten Uptimes (zulässige Einsatzphasen) erreichen für mehrere exemplarisch untersuchte Seegebiete weltweit die von der Industrie geforderten Werte (>95%).

## Entwicklung der Transferleitung

Metallische Wellrohre eignen sich zum Transfer von nahezu allen Fluiden, vor allem wenn sie über Eigenschaften verfügen, die den Einsatz von Kunststoff basierten Schlauchleitungen ausschließen. Solche Eigenschaften können zum einen ein besonderes Gefährdungspotential des Fluids sein, zum anderen aber auch spezielle physikalische oder chemische Besonderheiten. Im Fall von LNG ist dies insbesondere seine tiefe Temperatur und die damit verbundene stark eingeschränkte Materialauswahl im Bereich ferritischer Stähle oder Polymere, aber auch das Gefährdungspotential, dass bei Austritt des Fluids durch die niedrige Temperatur sowie durch die Brand- und Explosionsgefahr in Kombination mit Sauerstoff aus der Atmosphäre auftritt.

Besonderes Merkmal der SOTLL LNG-Transferleitung ist ihr vergleichsweise einfacher Aufbau mit seinen dennoch einzigartigen Sicherheitsmerkmalen.

Abb. 6: Aufbau der LNG-Transferleitung



Ein Edelstahlwellrohr (5) führt das LNG und stellt die primäre Dichtlage dar. Austenitischer Edelstahl eignet sich hervorragend für Anwendungen unter Tieftemperatur, da sowohl seine Festigkeitswerte als auch seine Dauerfestigkeit im Temperaturbereich bis  $-200^{\circ}\text{C}$  besser sind als bei Raumtemperatur. Ein zweites Edelstahlwellrohr (2) dient als sekundäre Dichtlage und bildet zusammen mit dem inneren Wellrohr die Doppelwandigkeit, die eine Leckage verhindert, falls das Innenrohr (5) seine Dichtigkeit verliert. Der Ringspalt, der durch die Wellrohre (5) und (2) gebildet wird, dient als Isolations-

raum sowie als Überwachungsraum. Dieser Ringspalt wird evakuiert, um die Wärmeleitung und Wärmekonvektion vom warmen Außenrohr zum tiefkalten Innenrohr zu verhindern. Um außerdem auch die Wärmestrahlung von außen nach innen zu reduzieren, werden um das Innenrohr mehrere Lagen reflektierender Folien (3) gelegt. Diese Lagen werden durch Vlies-Material separiert. Der Leitungsaufbau enthält weiter eine Armierung (4) zur Aufnahme von Lasten sowie einen Schutzmantel (1) aus Kunststoff.

## Wellrohrentwicklung

Aufbauend auf dem Vorgängerprojekt MPLS20 wurde im Projekt SOTLL die oben beschriebene Leitungskonstruktion dahingehend verbessert, dass eine erhöhte Dauerfestigkeit bzw. ein reduzierter Biegeradius möglich wurde. Aufbauend auf der Fertigung von Metallbälgen, bei denen mittels hydraulischem Innendruck und stauender Bewegung von Formwerkzeugen eine extrem tiefe Wellung mit kleinem Wellenabstand erzielt werden kann, wurde im Rahmen des Projektes SOTLL ein Verfahren entwickelt, das die Vorteile der kontinuierlichen Fertigung großer Längen aus dem MPLS20 Projekt mit Fertigung der tieferen Wellung von Metallbälgen kombiniert. Dazu wird ein Rohr zunächst flach vorgewellt. Dadurch wird die Geometrie für den folgenden Schritt des Stauchens vorgegeben. In dem folgenden Schritt des Stauchens wird dann – ohne die Notwendigkeit eines hydraulischen Innendruckes – eine deutlich höhere Welltiefe und ein kleinerer Wellenabstand erzielt, als es noch im Vorgängerprojekt MPLS20 möglich war.

Diese Verbesserung der Verfahrenstechnik wurde durch intensiven Einsatz numerischer Simulationen erzielt. Nur dadurch war es möglich, Versagensmechanismen ihren ursprünglichen Ursachen zuzuordnen und so eine Optimierung der Prozesse zielgerichtet durchzuführen, (siehe Abb. 7)

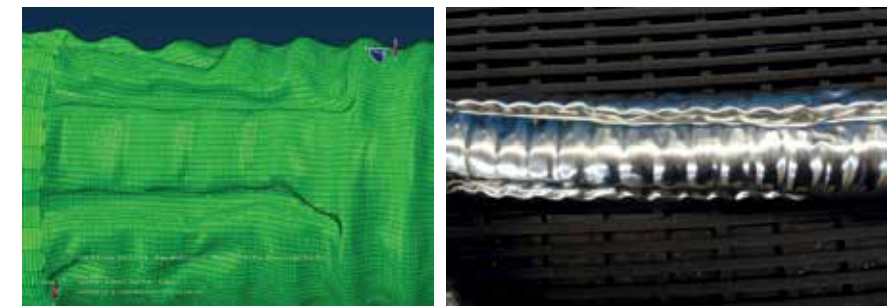


Abb. 7: Beispiel einer numerischen Simulation eines in der Praxis auftretenden Versagensbild der Wellrohrformung

Nach Abschluss der Optimierungsläufe ist es gelungen, adäquate Wellrohrmuster sowohl in small-scale, als auch in der benötigten Dimension von 400mm Innendurchmesser zu erstellen:

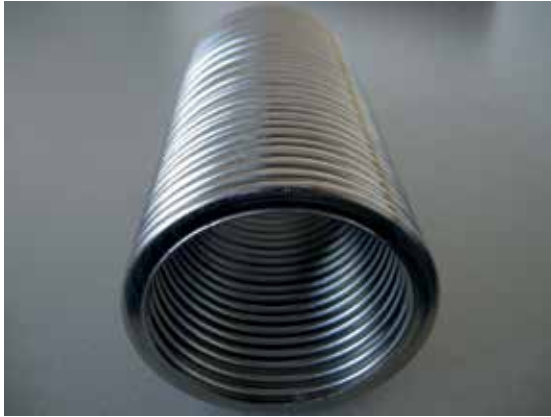


Abb. 8: Beispiel eines tiefgewellten Rohres, wie es mittels der SOTLL Technologie in großen Längen hergestellt werden kann

Versuchsreihen zum Ermüdungsverhalten wurden sowohl mit ungeglühten als auch mit geglühten full-scale Rohrmustern durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse entsprachen den Erwartungen und deckten sich qualitativ mit den zuvor berechneten Werten. Aus den gemessenen Proben wurde ersichtlich, dass eine Dauerfestigkeit ab einer Dehnung (Längenänderung des Prüflings bezogen auf die Ausgangslänge) von weniger als 5% eintritt.



Abb. 9: Versuchsstand für Dauer-Biege-Belastungen



Abb. 10: Prüfstände für axiale Ermüdungsuntersuchungen

Es wurden Glühversuche unter Verwendung unterschiedlicher Schutzgase durchgeführt, um den Einfluss des hohen Kaltverformungsgrades zu begrenzen. Bei Verwendung einer reduzierenden Schutzgasatmosphäre ergab sich eine optimale, blankgeglühte Oberfläche; andere Schutzgasgemische waren weniger vorteilhaft. Die erzielten Ergebnisse gaben Aufschluss über die Durchlaufgeschwindigkeit in einem Durchlaufglühofen, welcher das Glühen großer Rohrlängen ermöglicht.

Es wurden zudem Studien zu Variationen der Glühparameter in einem Stückglühofen durchgeführt, um die optimalen Betriebsparameter wie Temperatur, Durchlauf- und Abkühlzeit sowie Schutzgaszusammensetzung für den Durchlaufglühofen zu ermitteln.

Im Projekt wurden außerdem eine flexible Armierung zur Aufnahme von mechanischen Lasten sowie ein besonders flexibler Schutzmantel aus Kunststoff entwickelt.



Abb. 11: Leitungskonzept

Quelle: BRUGG

## Leitungsführung und Betrachtung der Biegesteifigkeit

Für das Leitungsführungskonzept wurden Biegelinienmodelle mittels Finite Elemente Methode (FEM) für die Leitung zwischen den Schwimmkörpern erstellt, um die der Belastung angepassten Biegeradien der Leitung zu ermitteln. Diese haben Einfluss auf die Leitungs konstruktion. Die Berechnung orientierte sich an den gegebenen Abständen zwischen den Schiffskörpern unter Annahme eines Abstands von maximal zehn Metern sowie eines Unterschieds in der Deckshöhe von Terminal zu Tanker von sieben Metern. Die Berechnungen ergaben, dass diese Parameter ein Abknicken der Leitung hervorrufen könnten, insbesondere bei einer U-förmigen Leitungsführung mit Oberbogen. Um die Gefahr des Abknickens zu reduzieren, wurde daher eine Leitungsführung unter einem Winkel von  $45^\circ$  an den Kopplungspunkten zwischen den Schiffen vorgesehen. Dadurch wurde zwar die zu überbrückende Strecke länger und die Biegeradien größer, aber die Gefahr des Abknickens sank. Das neue Leitungsführungskonzept, entwickelt durch den Projektpartner IMPaC, sieht einen teleskopierbaren Header vor, mit welchem die Übergabe zu Tankern mit verschiedenen Abständen der Anschlussflansche für die Transferleitungen in Side-by-Side-Konfiguration möglich ist. Durch diesen teleskopierbaren Header können Anschlussabstände von zwei bis vier Metern bedient werden.

Auf Grundlage der Annahme von einem Transfer pro Woche und unter der Berücksichtigung eines repräsentativen Seegangs (Prelude Seegangsgebiet, Nord-West-Australien) mit einem Sicherheitsfaktor von 3 ergaben die Berechnungen, dass für die Transferleitungen eine Lebensdauer von ca. 16 Jahren zu erwarten ist, was die Spezifikationen und Erwartungen noch deutlich übertrifft.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die finanzielle Förderung des Projektes sowie für die hervorragende fachliche und administrative Betreuung durch den Projektträger Jülich/Berlin (PtJ), namentlich bei Frau Dipl.-Ing. Barbara Grothkopp, Frau Dipl.-Betriebswirtin Cornelia Bude und Herrn Dipl.-Ing. Detlef Lehmann.

## Korrespondenzadressen

- Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr, Bereich Meerestechnik, SG17, Salzufer17-19, 10587 Berlin, Tel. +49 (0)30 314-23105; Prof. Günther Clauss (clauss(at)naoe.tu-berlin.de), Sven Stuppe (stuppe(at)naoe.tu-berlin.de), Matthias Dudek (dudek(at)naoe.tu-berlin.de)
- IMPaC Offshore Engineering GmbH, Hohe Bleichen 5, D-20354 Hamburg, Tel. +49 (0)40 355440-0; Dr.-Ing. Sven Hoog (hoog(at)impac.de), Johannes Myland (myland(at)impac.de)
- Nexans Deutschland GmbH, Kabelkamp 20, D-30179 Hannover, Tel. +49 (0) 511 676-0, Christian Frohne (christian.frohne(at)nexans.com), Christian Reiter (Christian.reiter(at)nexans.com)
- Brugg Rohrsysteme GmbH, Adolf Oesterheld Straße 31, D-31515 Wunstorf; Tel. +49 (0)5031 170-0; Jörn Homann (joern.homann(at)brugg.com), Oliver Herbst (oliver.Herbst(at)brugg.com)

## BioBind – Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern

Förderkennzeichen: 03SX308

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

(Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau)

M.Sc. Marcus Siewert

(Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau)

Dr. Martin Powilleit

(Universität Rostock, Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau)

### Ziel

Ziel des Verbundforschungsvorhabens BioBind ist die Entwicklung eines luftgestützten Ölhavariebekämpfungssystems als Ergänzung zu bestehenden Systemen, für eine schnelle Analyse und Überwachung von Ölverschmutzungen auf See sowie eine zeitnahe Bekämpfung und Reinigung insbesondere in Flachwassergebieten und küstennahen Bereichen.

Es werden biologisch abbaubare Binder, auf denen ölabbauende Mikroorganismen immobilisiert sind, eingesetzt. Die Binder werden luftgestützt ausgebracht, mit einem im Vorhaben zu entwickelnden Bergesystem (seeseitig und landseitig) geborgen und ihrer Verwertung zugeführt. Die Ölverschmutzung und die ausgebrachten Ölbinder werden mit einem kostengünstigen Ölspezifizierungs- und Überwachungssystem erfasst und überwacht. Um einen effektiven Einsatz der verschiedenen Komponenten zu gewährleisten, soll ein Unfallmanagementsystem entwickelt werden.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen wesentlich zur Entwicklung neuer Methoden und Techniken für die Ölunfallbekämpfung beitragen, die insbesondere in Seegebieten mit geringen Wassertiefen sowie bei Schlechtwetter mit hohem Seegang wirksam einsetzbar sind und zudem über hohe Transfergeschwindigkeiten zur Überwindung größerer Distanzen verfügen.

Der Artikel stellt das Forschungsvorhaben und dessen Einzelkomponenten vor und beschreibt die Forschungsergebnisse nach Abschluss des dreijährigen Projektes.



## 1. Einleitung

Der stetige Bedarf nach Rohöl und die ungleichmäßige geografische Verteilung der Ölreserven führen dazu, dass täglich sehr große Mengen Rohöl auf den Weltmeeren transportiert werden. Im Jahr 2012 wurden auf der Ostsee etwa 400 Millionen Tonnen Rohöl verschifft (Export: 250 Mio. t, Import: 150 Mio. t) [BTJ 2013]. Dies geschieht vor allem in Form großer Öltanker, welche ein maximales Ladevolumen von zwei Millionen Fass Öl (1 bbl.  $\approx$  159 l) erreichen können. Trotz verbesserter Sicherheitsvorkehrungen beim Bau und Betrieb dieser Schiffe kommt es immer wieder zu Unfällen auf See, bei denen Öl ins Meer gelangt. Zwar ist die Anzahl großer Ölhavarien in der Vergangenheit zurückgegangen, dafür ist ein Anstieg kleinerer Unfälle zu verzeichnen. In Abhängigkeit von der ausgetretenen Ölmenge können die Auswirkungen von Ölhavarien auf den Naturraum und auf die Wirtschaft erheblich sein. Eine schnelle und effektive Bekämpfung ist daher von sehr großer Bedeutung (PERRY & PANTON 2011).

Die Ölhavariebekämpfung kann in folgende Methoden unterteilt werden:

- Behandlung mit speziellen Chemikalien  
Die Wirkungsweise von Chemikalien zur Ölhavariebekämpfung ist sehr vielfältig, ihr Einsatz ist aber nicht unumstritten. Diese Option ist sehr stark von der lokalen Gesetzgebung abhängig (z. B. Verbot in der Ostsee, eingeschränkter Einsatz in der Nordsee, uneingeschränkter Einsatz im Golf von Mexiko).
- Verbrennung des Öls auf See  
Die Verbrennung des Öls auf See ist eine altbekannte Methode, die vor allem durch den Einsatz in Amerika während der Ölhavarie im Golf von Mexiko eine Renaissance erfahren hat, bisher in Europa aber nur sehr selten angewendet wurde.
- Mechanische Aufnahme  
Die mechanische Aufnahme des Öls ist die am besten untersuchte und daher vielfältigste und häufigste Methode.

Die Wirksamkeit einer Bekämpfungsmaßnahme ist abhängig vom Öltyp und dessen Zustand auf See (Schichtdicke, Viskosität, Dichte etc.) sowie von den vorherrschenden meteorologischen und hydrodynamischen Randbedingungen [FINGAS 2012, ITOFF 2011]. Öl kann sich sehr schnell auf der Wasseroberfläche ausbreiten, das führt zu sehr dünnen Ölschichten, was die Effizienz der Bekämpfungsmaßnahmen erheblich verringert [RAUTERBERG & SPENGLER 2009]. Hohe Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten verringern ebenfalls die Effizienz vieler Bekämpfungsmaßnahmen [WORLD CATALOGUE 2013].

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel des Forschungsvorhabens BioBind, eine schnelle, seegangs- und wassertiefenunabhängige Bekämpfungsmethode zu entwickeln, welche als Ergänzung zu bestehenden System eingesetzt werden kann.

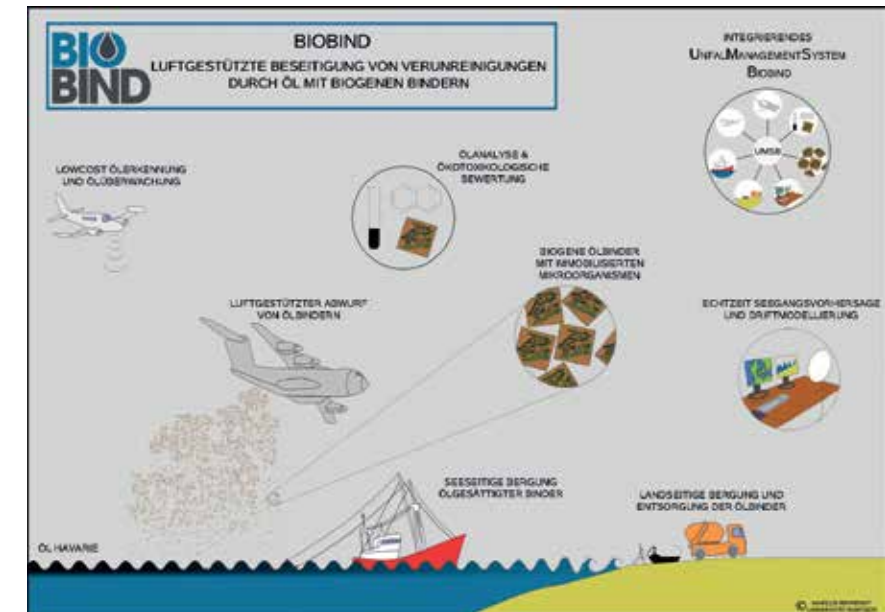


Abb. 1: Schematischer Überblick des Ölhavariebekämpfungssystems BioBind und dessen Einzelkomponenten.

## 2. Forschungsvorhaben BioBind

Das Konsortium des Verbundvorhabens BioBind bestand aus sieben Projektpartnern und hatte eine Laufzeit von drei Jahren (07/2011 – 07/2014). Die Koordination wurde vom Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau an der Universität Rostock durchgeführt.

Durch die Kombination innovativer Einzelkomponenten wurde ein integriertes Gesamtsystem zur Ölhavariebekämpfung entwickelt. Auf Grundlage dieses Ansatzes wurden Anforderungskataloge erstellt, deren Aufgabe es war die verschiedenen Anforderungen aller Einzelkomponenten und somit aller Projektpartner miteinander in Einklang zu bringen. Die Auswertung dieser Daten legte den Grundstein für die weitere Projektarbeit. In Abbildung 1 ist das Gesamtkonzept BioBind schematisch dargestellt, die Einzelkomponenten werden nachfolgend beschrieben.

## 2.1 Lowcost Ölerkennung und Überwachung

Projektpartner: AGRO-SAT

Im Falle einer Havarie ist es für eine optimale Einsatzplanung unerlässlich, die räumliche Ausdehnung der Ölverschmutzung und deren Driftverhalten zu kennen. Dies geschieht über den Einsatz eines kostengünstigen Spektrometers. Ein Kleinflugzeug (z.B. Cessna 172) wird mit einer Linse im Rumpf ausgestattet, welche mit dem Spektrometer verbunden wird. Das Spektrometer misst das reflektierte Licht, analysiert die Energiedichte der verschiedenen Wellenlängen und errechnet so für jede Messung ein individuelles Spektrum. Die Größe des Untersuchungsgebietes pro Messung hängt von der Flughöhe ab. Öl auf der Wasseroberfläche verändert das Reflexionsverhalten des Seewassers erheblich und ermöglicht so die Identifikation von ölverschmutztem Wasser.

Während der ersten Projekthälfte wurde eine sehr umfangreiche Datenbank mit verschiedenen Messungen im Labor erzeugt. Dafür wurden Ölkonzentration und Hintergrundfarbe des Messgefäßes variiert, anschließend wurde eine Vielzahl von Messungen im Wellenbecken und im Freiland durchgeführt. Der Datenbankumfang beträgt aktuell 8000 Messwerte. Im Einsatzfall wird jede Messung noch im Flugzeug mit der Datenbank verglichen. Als Ergebnis wird eine Aussage darüber getroffen, ob eine Ölverschmutzung vorliegt oder nicht. Durch eine Georeferenzierung der Messungen kann eine Karte mit den Messergebnissen erstellt werden. Diese Karte ist von gewöhnlichen GPS-Handgeräten lesbar und lässt sich über eine Website abrufen. Eine kontinuierliche Überwachung der Ölhavarie ist dadurch gewährleistet.

## 2.2 Biogene Ölbinder

Projektpartner: Technische Universität Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik

Zur Aufnahme des Öls sind biogene Ölbinder entwickelt worden. Die Binder bestehen aus Holzfasern und natürlichen Zusatzstoffen und haben eine Größe von 50 mm x 50 mm x 4 mm. Das Ölaufnahmevermögen liegt bei etwa 650 kg Öl / m<sup>3</sup> Binder.

Die Schwimmfähigkeit der Binder beträgt mindestens 20 Tage. Diesen Eckdaten liegen intensive Entwicklungsarbeiten im Labor und auf See zu Grunde. Neben der stofflichen Zusammensetzung spielt auch die Größe und Form für die Ausbringung und Bergung der Binder eine wichtige Rolle. Untersuchungen zum Sorptionsverhalten der Binder haben gezeigt, dass die hydro-

dynamischen Belastungen auf See nicht zu einer Auswaschung des aufgenommenen Öls führen. Eine ökotoxikologische Bewertung der Binder wurde ohne negative Ergebnisse durchgeführt, die offizielle Zertifizierung und Zulassung als geprüftes Ölbindemittel wurde in der Projektlaufzeit durchgeführt. Abbildung 2 zeigt verschiedene Entwicklungsstufen des Binders (ausführliche Beschreibung der Binderentwicklung siehe UNBEHAUN et al. 2014).



Abb. 2: Verschiedene Bindertypen (v.l.) aus Seegras und Hanf, Holzfaser sowie Holzfaser mit verschiedenen Zusatzstoffen (Quelle: Technische Universität Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik)

## 2.3 Ölabbauende Mikroorganismen

Projektpartner: Universität Leipzig, Institut für Biologie, Abteilung Pflanzenphysiologie

Auf den Bindern werden zusätzlich ölabbauende Mikroorganismen immobilisiert, welche aus der Ostsee isoliert wurden. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, dass Öl bzw. einzelne Bestandteile schneller abzubauen als es natürlicherweise von statten geht und die negativen Auswirkungen der Ölverschmutzung zu verringern. Im ersten Projektjahr wurden an verschiedenen Örtlichkeiten in der Ostsee Wasserproben genommen (Kiel, Lübeck, Rostock, Sassnitz und St. Petersburg). Der abnehmende Salzgehalt in der Ostsee von West nach Ost wurde dabei berücksichtigt. Aus diesen Wasserproben wurden verschiedene Mikroorganismen isoliert (Bakterien, Algen und Cyanobakterien) und anschließend auf verschiedenen Ölsorten kultiviert. Dadurch konnte die Resistenz der Mikroorganismen gegenüber den giftigen Ölbestandteilen ermittelt sowie deren Aufnahme bzw. Abbau verschiedener Ölbestandteile bestimmt werden (SAFONOVA 2014). Im Ergebnis wurden die leistungsfähigsten Isolate zu einem Konsortium zusammengefügt, vermehrt und anschließend gefriergetrocknet. Die Konsortien werden im Einsatzfall verflüssigt und auf die Binder aufgebracht, wodurch der natürlich auftretende Prozess der Bioremediation beschleunigt wird. Verschiedene

Laboranalysen (Fluorimetrie, Gaschromatographische Analysen, Zählung von Zellzahlen) belegen die Wirksamkeit der Konsortien beim Abbau verschiedener Ölkomponenten. Eine generelle Aussage über den Abbau aller Ölbestandteile kann aufgrund der vielfältigen Zusammensetzung von Rohöl nicht getroffen werden, der positive Effekt angereicherter Mikroorganismenkonsortien ist aber erwiesen. Abbildung 3 zeigt den Ölabbau durch Mikroorganismen nach drei Tagen.

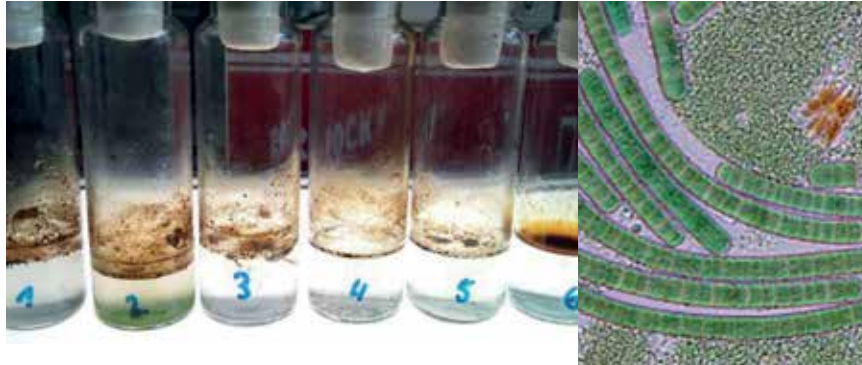


Abb. 3: Ölabbau durch Mikroorganismen nach drei Tagen im Laborversuch (links), Mikroorganismen aus einer Anreicherungskultur unter dem Mikroskop 20-fach vergrößert (rechts) (Quelle: Universität Leipzig, Institut für Biologie)

## 2.4 Ölanalyse und ökotoxikologische Bewertung

Projektpartner: Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde Abt. Meereschemie

Rohöl ist eine Substanz, die aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten besteht. Zur Bestimmung des Ölabbaus und weiterer Analysen ist eine genaue Kenntnis der Zusammensetzung erforderlich. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Öl (insbesondere die Viskosität) ist die analytische Verarbeitung sehr komplex. Die Messgeräte (z. B. Gaschromatographen) müssen entsprechend eingerichtet und kalibriert werden, nur so lassen sich belastbare Messergebnisse erzeugen. Nach umfangreichen methodischen Vorbereitungen war es möglich, verschiedene Alkane und polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), deren Konzentration und Abbauverhalten zu analysieren. Das im Vorhaben verwendeten Rohöl REB1 (Russian Export Blend 1) wurde im Gaschromatografen analysiert und für weitere Untersuchungen aufbereitet (ausführliche Beschreibung der Analysen siehe HÄHNEL et al. 2014).

Die Binder (inkl. Zuschlagsstoffe) und der mikrobielle Ölabbau (inkl. aller Abbauprodukte) wurden ökotoxikologisch bewertet, ein Gefährdungspotential konnte nicht festgestellt werden. Die Mikroorganismen des Konsortiums wurden taxonomisch bestimmt.

## 2.5 Luftgestützte Ausbringung von Ölbindern

Projektpartner: FSB Airservice

Ungehinderte Ölausbreitung führt zu sehr großen Ölteppichen mit sehr geringen Schichtdicken, was die Reinigung sehr zeitaufwendig, kostenintensiv und ineffizient macht. Um eine möglichst kurze Transportzeit der Binder vom Lagerstandort zum Ort der Ölhavarie zu realisieren, werden die Binder per Flugzeug transportiert und luftgestützt ausgebracht. Zu diesem Zweck wurde im Forschungsvorhaben ein Kleinflugzeug vom Typ Dromedar M-18 an die Anforderungen der Binderausbringung angepasst und eine Vielzahl von Probeflügen und Abwürfen absolviert. Der Laderaum des Flugzeugs hat ein Volumen von 1,5 m³ und kann über eine hydraulische Klappe entleert werden. Im Laufe der Forschungsarbeit wurden folgende Themenbereiche untersucht: Beladung, Flugtaktik, Datenkommunikation, Flughöhe, Abwurfverhalten der Binder, Streudichte, Applikation der Mikroorganismen sowie Transport und Logistik. Der große Vorteil der Dromedar M-18 gegenüber anderen Flugzeugtypen ist vor allem der günstige Betrieb (Flugstunde ca. 250 €).

Das relativ kleine Ladevolumen kann durch den kombinierten Einsatz mehrerer Maschinen kompensiert werden, die Übertragung des Systems auf größere Flugzeugtypen ist aber grundsätzlich möglich. Abbildung 4 zeigt den Binderabwurf auf der Ostsee im November 2013.



Abb. 4: Binderabwurf auf der Ostsee (Flughöhe ca. 25 m) im November 2013 (Quelle: E. Safonova)



## 2.6 Seeseitige Bergung

Projektpartner: Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik

Mit einer neu entwickelten Netzsperre wird der Binder seeseitig geborgen. Dieses Bergemittel kombiniert Elemente gewöhnlicher Ölsperren mit Elementen von Fischereinetzen. Die Netzsperre wird von zwei Schiffen geschleppt und kann auch bei rauen Wetterbedingungen eingesetzt werden. Die Binder werden mit zwei Leitarmen konzentriert und in einem Steert (Netzsaack) am Ende der Sperre gesammelt. Ist der Steert gefüllt, wird er auf See von den Seitenarmen gelöst und auf ein Transportschiff (z.B. seegängige Schute oder offene Container an Deck von Multifunktionsschiffen) verladen. Ein Auspressen von Öl durch die Belastungen beim Schleppen und Verladen findet nicht statt. Die üblichen Versagensfälle von Ölsperren (Unterströmen und Überspülen) konnten durch den Einsatz des Netzes und dessen guten hydrodynamischen Verhaltens deutlich minimiert werden. Daraus resultiert ein erheblich größeres Einsatzfenster im Vergleich zu herkömmlichen Sperren. Der Einsatz von Spezialschiffen (z. B. mit integrierten Ölauffangeinrichtungen) für die Ausbringung und Bergung ist nicht erforderlich, gewöhnlich Fischkutter bzw. Tonnenleger erfüllen alle Anforderungen. Intensive numerische Modellierungen und hydraulische Laborversuche haben zu einem geringen Schleppwiderstand bei optimalem Auftriebs- und Verdrängungsverhältnis geführt. Abbildung 5 zeigt einen Teil der Netzsperre für Versuche im Schleppkanal des Lehrstuhls Meerestechnik.

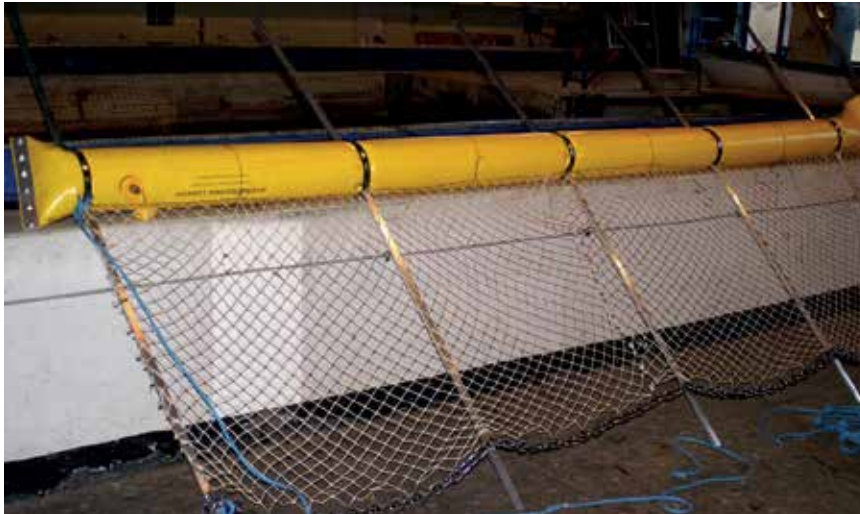


Abb. 5: Teilstück der Netzsperre mit horizontalem Auftriebskörper, vertikaler Netzfixierung und Kettengewichten (Quelle: Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik)

## 2.7 Landseitige Bergung

Projektpartner: Universität Rostock Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

Für den Fall, dass eine seeseitige Bergung nicht möglich ist, da der Seegang zu stark oder die Wassertiefe zu gering ist, können die Binder auch landseitig geborgen werden. Die hydrodynamischen Belastungen der Brandungszone überstehen die Binder nahezu schadlos. Durch die Kombination verfügbarer Vakuumtechnologien (industrielle Laub- bzw. Abfallsauger) mit einer fahrbaren Transporteinheit und einer kleinen Zugmaschine (Quad, Kleintraktoren o.ä.), wurde eine küstentaugliche Aufnahmeeinheit entwickelt, mit der größere Bindermengen aufgenommen werden können. Die see- und landseitig aufgenommenen Binder werden nach der Bergung thermisch verwertet.

## 2.8 Seegangsvorhersage und Driftmodellierung

Projektpartner: Universität Rostock Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau, Leibniz Institut für Ostseeforschung Warnemünde Abteilung physikalische Ozeanographie

Zur optimalen Einsatzplanung im Verlauf einer Ölhavariebekämpfung ist es unverzichtbar, den zu erwartenden Seegang zu kennen. Auf Grundlage einer hoch aufgelösten Bathymetrie (Auflösung 1 m) werden Echtzeit-Winddaten zur Simulation der Seegangsverhältnisse verwendet. In Verbindung mit Langzeitseegangsstatistiken kann eine effektive, den Randbedingungen angepasste Einsatzplanung erfolgen. Zusätzlich wurden Driftmodellierungen für besonders gefährdete Seegebiete mit typischen Wetterlagen durchgeführt. Die Driftwege der Ölverschmutzungen und der Binder sowie potentielle Anlandungsorte können somit bestimmt werden.

## 2.9 Integrierendes Unfallmanagementsystem BioBind

Projektpartner: Universität Rostock Lehrstuhl für Geotechnik und Küstenwasserbau

Das Gesamtsystem BioBind besteht aus den zuvor vorgestellten Einzelkomponenten, die nur in abgestimmter Kombination optimal genutzt werden können. Aus diesem Grund wurden die Anforderungen der Projektpartner über die gesamte Projektlaufzeit immer wieder mit einander in Einklang gebracht. Durch die Entwicklung eines Unfallmanagementsystems wurden alle Komponenten zusammengeführt und die bestmögliche Integration in vorhandene



Strukturen gewährleistet. Dies geschah in intensiver Abstimmung mit dem Havariekommando und den lokalen Gemeinden und Behörden.

Die Entwicklung eines theoretischen Lagerkonzeptes der BioBind Einzelkomponenten für die gesamte deutsche Küste wurde unter Nutzung des GIS-Programms VPS – Vorsorgeplan Schadstoffunfallbekämpfung vom Ingenieurbüro GICON als Unterauftrag erstellt.

### 3 Projektfortschritt

Im zurückliegenden Projekt wurden die theoretischen Konzepte entwickelt und aufeinander abgestimmt. Durch eine Vielzahl von numerischen Modelluntersuchungen und Laborversuchen aller Partner wurden diese weiterentwickelt und verbessert. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse wurden mesoskalige Freilandversuche sowie Versuche im Originalmaßstab durchgeführt. Den Abschluss des Projekts bildeten ein öffentlicher Workshop zur Ergebnispräsentation sowie ein weiteres Freilandexperiment mit allen Komponenten.

#### 3.1 Mesokosmen

Die Komponenten Binder und Mikroorganismen und deren Zusammenwirken wurden unter freilandähnlichen Bedingungen untersucht. Dafür wurden großen Rundtanks mit Ostseewasser gefüllt (ca. 260 l) und verschiedene Ansätze aus Ostseewasser, Rohöl, Mikroorganismen und Bindern erzeugt. Die Rundtanks wurden im Freiland aufgestellt, um möglichst realistische Bedingungen zu erzeugen.

Im Versuchsverlauf wurden u.a. folgende Parameter gemessen: Ölaufnahme durch Binder, Ölabbau durch Mikroorganismen, Sauerstoff- und Nährstoffverfügbarkeit im Wasserkörper, Temperatur, Salzgehalt etc.).

Je nach Fragestellung wurden die Ansätze wenige Tage bis mehrere Wochen in Bewegung gehalten und untersucht. Abbildung 6 zeigt die Rundtanks auf dem Gelände des Lehrstuhls für Geotechnik und Küstenwasserbau der Universität Rostock.



Abb. 6: Rundtanks (eingepackt in Rettungsdecken zur Verhinderung einer unnatürlichen Erhitzung) für Mesokosmenversuche mit integriertem Probennehmer (roter Auslaufhahn) und verschiedenen Messgeräten im Alucontainer

#### 3.2 Freilandversuche auf der Ostsee

Zur Erprobung des Gesamtsystems wurden drei große Freilandversuche auf der Ostsee durchgeführt. Dafür wurden das Forschungsschiff „Elisabeth Mann Borgese“ ein zweites Schleppfahrzeug sowie ein Arbeitsboot eingesetzt. Unterstützt wurden die Versuche durch die Kleinflugzeuge Dromedar M-18 zu Binderausbringung und Cessna 172 zur Fernerkundung. An zwei Terminen im Jahr 2013 und einem Termin im Jahr 2014 wurden luftgestützt größere Mengen an Bindern ausgebracht, deren Drift verfolgt und anschließend seeseitig geborgen. Zeitgleich wurden an Deck der „Elisabeth Mann Borgese“ Mesokosmenversuche durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.1). Bei unterschiedlichen meteorologischen und hydrodynamischen Randbedingungen konnten wertvolle Ergebnisse zum Verhalten des Gesamtsystems gesammelt werden. Die Erprobung der Kommunikationswege und einsatztaktische Fragestellungen waren weitere wichtige Elemente der Ausfahrten. Abbildung 7 zeigt das Gesamtsystem im Einsatz während der Ausfahrt im Juli 2013 auf der Ostsee.



Abb. 7: Das Forschungsschiff "Elisabeth Mann Borgese" (links) und der Fischkutter "Prerow" auf der Ostsee beim Schleppen der Netzsperre mit Steert während der Ausfahrt im Juli 2014 in der Mecklenburger Bucht vor Rostock (Quelle: FSB Airservice)

#### 4 Ausblick

Das Forschungsvorhaben BioBind hat die Einzelkomponenten für ein neues Ölhavariabekämpfungssystem entwickelt und deren Zusammenwirken getestet. Zur Entwicklung eines marktreifen Produktes bedarf es weiterer praktischer Optimierungsarbeit. Den Besonderheiten der Arbeit auf See und in der Luft ist dabei ebenso Rechnung zu tragen wie den Strukturen von Feuerwehren, Technischem Hilfswerk und Havariekommando. In einem Folgevorhaben sollen das Konzept technisch optimiert sowie die industrielle Herstellung und Markteinführung vorbereitet werden.

#### 5 Danksagung

Das Forschungsvorhaben BioBind wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Forschungsprogramms für Schiffbau, Schifffahrt und Meerestechnik 2011-2015 „Maritime Technologien der nächsten Generation“ gefördert (Förderkennzeichen: 03SX308). Unser Dank gilt weiterhin allen Projektpartnern und dem Projektträger Jülich für die gute Zusammenarbeit sowie dem Havariekommando Cuxhaven, der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg und dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg für ihre Projektunterstützung.

#### 6 Literatur

- [1] BTJ Baltic Transport Journal, 2013. BALTIC OIL YEARBOOK 2012/2013 –black gold's path across the BSR – Baltic Press, Danzig.
- [2] Fingas, M. (ed.), 2011. Oil spill science and technology: prevention, response and cleanup, Gulf Professional Publishing – Elsevier, Amsterdam.
- [3] Hähnel, J.; Jescheck, J.; Zimmermann, R.; Schulz-Bull, D.; 2014. Qualitative and quantitative determination of microbial oil degradation effects in Baltic Sea water samples by various analytical methods. In: International Oil Spill Conference Proceedings 2014
- [4] ITOPF – The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, 2011. Technical Information Papers 2 – Fate of marine oil spills, Impact PR & Design Limited, Canterbury.
- [5] Perry, R.; Panton, S.; 2011. The Macondo Well Blowout: Political Posturing and the Media Machinations – Help or Hindrance? In: International Oil Spill Conference Proceedings: 2011-294
- [6] Rauterberg, J.; Spengler, D.-U. et al.; 2009. VPS 12– Vorsorgeplan Schadstoffunfallbekämpfung - VPS Arbeitsgruppe Hamburg. [http://www.vpsserver1.de/vpsweb/\(S\(5n33kn45l2vs0h45aephd33s\)\)/vps\\_buch/vps\\_bekaempfungshandbuch\\_web\\_2009/default.htm](http://www.vpsserver1.de/vpsweb/(S(5n33kn45l2vs0h45aephd33s))/vps_buch/vps_bekaempfungshandbuch_web_2009/default.htm)
- [7] Safonova, E.; König, S.; Novel oil-degrading algal-bacterial associations for the treatment of oil pollution in the Baltic Sea (Poster). In: International Oil Spill Conference Proceedings 2014
- [8] Siewert, M.; Saathoff, F. & Powilleit, M.: BioBind - Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern. Tagungsband HTG-Kongress 2014 - 100 Jahre HTG, Berlin Verlag: neumann medien, ISBN: 978-3-9815800-1-3, Seite: 263 – 271, 2014
- [9] Unbehaun, H.; Hieronymus, T.; Tech, S.; Wagenführ, A. 2014. Development and properties of a new oil binding system for marine application. In: International Oil Spill Conference Proceedings 2014
- [10] World Catalog, 2013. World Catalog of Oil Spill response Products, SL Ross Environmental Research Limited, Ottawa.

## EPES: Effiziente Prognose vibroakustischer Eigenschaften in der Schiffsentwurfsphase

Förderkennzeichen: 03SX305

Stephan Lippert (Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Institut für Modellierung und Berechnung, Projektkoordinator EPES)  
Bernd Stritzelberger (Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Institut für Modellierung und Berechnung)  
Otto von Estorff (Technische Universität Hamburg-Harburg,  
Institut für Modellierung und Berechnung, Projektleitung EPES)  
Robin Seiler (Technische Universität Berlin, Fachgebiet Entwurf  
und Betrieb Maritimer Systeme)  
Sebastian Mathiowetz (Technische Universität Berlin,  
Fachgebiet Technische Akustik)  
José Luis Barros (Technische Universität Berlin,  
Fachgebiet Technische Akustik)  
Gerd Holbach (Technische Universität Berlin,  
Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme)  
Julia Groß (Technische Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik)  
Joachim Bös (Technische Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik)  
Marius Karger (Novicos GmbH)  
Olgierd Zaleski (Novicos GmbH)  
Christoph Tamm (Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit  
und Systemzuverlässigkeit)  
Heiko Krüger (Flensburger Schiffbau-Gesellschaft)  
Bastian Ebeling (ThyssenKrupp Marine Systems, Surface Vessels)  
Insa Bech (ThyssenKrupp Marine Systems, Surface Vessels)  
Norbert Hövelmann (ThyssenKrupp Marine Systems, Submarines)  
Wolfgang Sichermann (ThyssenKrupp Marine Systems, Surface Vessels)  
Nils Reichstein (Fr. Lürssen Werft)  
Bernhard Urban (Fr. Lürssen Werft)

### Einleitung

Heutige, üblicherweise unter Gewichtsaspekten optimierte Schiffsentwürfe stellen dünnwandige orthotrope Plattenstrukturen in Leichtbauweise dar, die u.a. durch Antriebsanlagen, Hilfsaggregate sowie durch hydrodynamische Effekte zu Schwingungen angeregt werden und infolgedessen Schall im vom Menschen akustisch wahrnehmbaren Frequenzbereich abstrahlen. Überschreitet

der Schalleintrag bestimmte Pegel, wird er nicht nur als unangenehm und störend empfunden ( $\leftrightarrow$  Komfort), sondern kann auch zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen, Aufmerksamkeits- und Leistungsdefiziten führen ( $\leftrightarrow$  Arbeitsschutz). Dem wird durch entsprechende nationale und internationale Grenzwerte begegnet. Die gesteigerten Ansprüche seitens der Auftraggeber an eine Werft spiegeln sich bereits bei Vertragsabschluss in den vereinbarten maximalen Schallpegeln für die verschiedenen Schiffsbereiche wider, deren strenge Einhaltung insbesondere bei Passagierschiffen und Luxusyachten ein kaufentscheidendes Kriterium darstellt.

Während die Auslegung der schiffbaulichen Stahlstruktur hinsichtlich der strukturdynamischen Anforderungen bis 20 Hz heute weitgehend beherrscht wird, kann die Schiffsakustik oftmals nicht mit den auf der Werft üblichen klassischen Auslegungsmethoden zufriedenstellend prognostiziert und optimiert werden. Die Einhaltung der vertraglich definierten Grenzwerte kann bislang oft erst nach Fertigstellung der Integration sämtlicher Aggregate durch Messungen bei Inbetriebnahme und Probefahrt endgültig beurteilt werden, wobei Überschreitungen im schlimmsten Fall zum Rücktritt des Auftraggebers vom Kaufvertrag mit immensen wirtschaftlichen Konsequenzen für die Werft führen. Daher müssen oft nachträglich zeit- und kostenintensive Zusatz- oder Umbaumaßnahmen am fertigen Schiff vorgenommen werden, was für die Werften ein nicht oder nur schwer kalkulierbares finanzielles Risiko darstellt. Gelingt es jedoch, bereits im Entwurfsstadium mögliche akustische Probleme zu identifizieren, können grundlegende Entwurfsentscheidungen dahingehend beeinflusst werden, nachträgliche kostenintensive Sekundärmaßnahmen zu vermeiden und das Projekt bereits in frühen Phasen technisch weitgehend abzusichern.

Die in EPES durchgeführten Forschungsarbeiten ermöglichen es den Werften, in jeder Phase des Entwurfs- und Konstruktionsprozesses eine sichere Vorhersage der akustischen Eigenschaften einer Neuentwicklung treffen zu können. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf eine Verringerung des zeitlichen und personellen Aufwandes bei gleichzeitig guter Prognosegenauigkeit gerichtet. Zu diesem Zwecke wurde prototypenhaft ein Simulationswerkzeug entwickelt, dessen Berechnungskern auf numerisch-experimentellen Methoden beruht und das sich in die jeweiligen Entwicklungsumgebungen der beteiligten Werften integrieren lässt.

Eine besondere Herausforderung bei der Auswahl der anzuwendenden Berechnungsmethoden stellt dabei die zu Beginn eines Neubaus oftmals eingeschränkte Datenbasis dar. Trotz der flachen Beschreibungstiefe im frühen Entwurfsstadium soll durch die Prognose der akustisch relevanten Kenngrößen das frühzeitige Erkennen möglicher Problembereiche ermöglicht werden. Gleichzeitig sollen akustische Verbesserungsmaßnahmen durch gezielte

Variation der Einflussgrößen in allen Bearbeitungsphasen des Entwurfs- und Konstruktionsprozesses ausgelegt und beurteilt werden können. Der Grad der Vorhersagegenauigkeit soll durch fortschreitende Verdichtung der Modellierungstiefe flexibel an das jeweilige Projektstadium angepasst und verbessert werden können.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden im Rahmen des Projektes mit der Statistischen-Energie-Analyse (SEA) und der Energie-Finite-Elemente-Methode (EFEM) parallel zwei verschiedene Ansätze verfolgt, die eine Anpassung an die vorliegende Beschreibungstiefe erlauben. Zur Validierung der entwickelten Methoden wurden fortlaufend detaillierte experimentelle Untersuchungen sowohl an speziellen Versuchsstrukturen (Decks-haus-Mock-up, Labor) als auch auf Probefahrten vorgenommen. Die oben genannten Ansätze werden im Folgenden kurz beschrieben und die dabei erzielten wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst.

### **Bedeutung und Bewertung der akustischen Eigenschaften von Schiffsentwürfen**

Die Aktualität der Lärmproblematik auf Schiffen zeigt sich nicht zuletzt durch die Neuregelung der schalltechnisch international wichtigsten Vorschrift des Code on Noise Levels on Board Ships durch die IMO. Wesentliche Änderungen in der neuen Vorschrift sind neben der Verschärfung bestimmter Schall-druckpegelgrenzen insbesondere die partielle Einbindung in die SOLAS-Konventionen, wodurch die festgelegten Grenzwerte nicht mehr nur empfehlenden Charakter besitzen, sondern für Neubauten mit Fertigungsbeginn ab Juli 2014 rechtsverbindlich gelten. Beispielsweise wird im Kabinenbereich eine Reduktion gegenüber der alten Empfehlung aus dem Jahre 1984 um 5 dB auf 55 dB(A) wirksam [1][2].

Der Schallschutz wird anhand von A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel-Obergrenzen reglementiert. Die Grenzwerte bilden im Hinblick auf die Schallexposition der Crew die technische Absicherung zur Gewährleistung des unfallfreien Betriebs. Hierunter fällt die Vermeidung von Aufmerksamkeits- und Leistungseinbußen aufgrund störender Geräuschsituationen, die Wahrung der Arbeitsschutzbestimmungen, die Gewährleistung von Regenerationsmöglichkeiten in Unterkünften sowie die Gewähr der Sprachverständlichkeit in sicherheitsrelevanten Bereichen.

Zuständig für die Prüfung der schalltechnischen Anforderungen und die Abnahme des Schiffes ist die beauftragte Klassifikationsgesellschaft. Neben den Arbeitsschutzanforderungen formulieren die Klassifikationsgesellschaften verschiedene Komfort-Stufen mit höheren Anforderungen für unterschiedliche



Funktionsbereiche, um die akustische Qualität mittels verschiedener Klasse-abzeichen zu berücksichtigen. Der Übergang zwischen Arbeitsschutz und Schall als Komfortkriterium wird anhand dieser Einstufungen vorgenommen. Die Einteilung in die Klasse erfolgt ebenfalls nach den maximal zulässigen A-bewerteten, energieäquivalenten Dauerschallpegeln. Zudem werden bauakustische Größen wie das Schalldämmmaß, das Trittschalldämmmaß oder die Sprachverständlichkeit optional in die Betrachtungen integriert [3][4][5].

Speziell im Bereich der Passagierschiffe und Yachten sehen sich Werften, Reedereien und Zulieferer, wie eingangs bereits erwähnt, mit den steigenden Komfortansprüchen ihrer Kunden konfrontiert. Ein produktgerechtes Klangbild impliziert mutmaßlich hohe Qualität. Als Konsequenz genügt es zwar formal, die geforderten Schalldruckpegel zu unterschreiten, jedoch ist die Beschreibung der Geräuschsituation durch dB(A)-Werte im Kontext von Komfort und akustischer Qualität als unzureichend anzusehen. Dies liegt vor allem daran, dass die A-Bewertung lediglich eine sehr grobe Näherung der menschlichen Lautstärkenwahrnehmung widerspiegelt und eine geringe Lautstärke nicht mit akustischem Wohlbefinden gleichbedeutend ist [6]. Seit geraumer Zeit sind daher z.B. im Automotive-Bereich komplexere Vorgehensweisen zur Identifikation geeigneter Beschreibungsparameter etabliert. Die Datengrundlage bilden dabei quantitative (physikalische Deskriptoren) und qualitative (sensitive Deskriptoren) Eingangsdaten [7]. Ein solches Modell wurde im Rahmen von EPES auch für die Ermittlung akustischer Bewertungskriterien im Schiffbau entwickelt. Abbildung 1 zeigt die Grundstruktur dieses Modells.

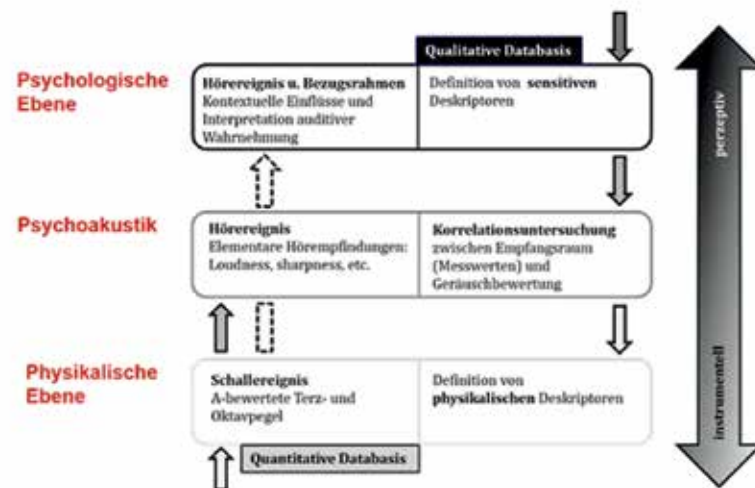


Abb. 1: Methodik zur Ermittlung akust. Bewertungskriterien im Schiffbau

Hieraus leiten sich folgende Arbeitsschritte ab:

- Aufnahme von Audiomaterial während Probefahrtmessungen
- Sichtung und Auswahl geeigneter, repräsentativer Stimuli
- Durchführung und Auswertung von Hörversuchen
- Physikalische, psychoakustische und raumakustische Analysen der Messdaten (Stimuli)
- Korrelationsanalyse zwischen Hörversuchsurteil und Messdaten

Bei der Hörversuchsreihe handelte es sich um einen Dominanzpaarvergleich. Das zu bewertende Kriterium war die Lästigkeit eines Geräusches. Die Testindividuen sollten entscheiden, welches der jeweils paarweise vorgespielten Geräuschbeispiele sie als weniger lästig empfinden. Die anschließend durchgeführten Korrelationsanalysen haben gezeigt, dass der psychoakustische Parameter Lautheit [8] mit den sensorischen Bewertungen aus den Hörversuchen in sehr hohem Maße negativ korreliert (je geringer die Lautheit, desto angenehmer die Geräuschsituation), so dass dieser Parameter bestens für die akustische Bewertung schiffbaulicher Entwürfe geeignet ist. In anderen kürzlich durchgeführten Forschungsarbeiten werden weiterhin die Room Criteria Mark II als Maß zur Beschreibung der Geräuschsituation auf Schiffen empfohlen [9]. Die Ergebnisse wurden jedoch nicht auf der Basis von Hörversuchen entwickelt. Zudem waren psychoakustische Parameter nicht Gegenstand der Analysen.

### Möglichkeiten der Quellbeschreibung: Mobilitätenansatz

Unabhängig von den verwendeten Bewertungskriterien ist die zuverlässige Vorhersage der zu erwartenden Schalleinträge der ausschlaggebende Faktor, um Schiffsentwürfe akustisch optimieren zu können. Damit die Schallausbreitung innerhalb der Schiffsstruktur mittels Energiemethoden berechnet werden kann, muss als Eingangsgröße die übertragene Leistung der an Bord vorhandenen Körperschallquellen bekannt sein, welche sich aus Kraft und Schnelle an den Kontaktpunkten ergibt. Da sich diese jedoch von Installation zu Installation unterscheiden, sind für ein Prognosemodell installationsunabhängige Eingangsgrößen zu wählen. Die in EPES entwickelten Ansätze basieren daher auf der freien Schnelle der Quelle, der Transfersteifigkeit der Isolatoren und den Mobilitäten des Fundaments. Im Fall starrer Kopplung sind aufgrund der im Schiffbau vorliegenden ähnlichen Impedanzverhältnisse von Quelle und Empfänger die Mobilitäten der Quelle einzubeziehen. Die

Übertragung von Körperschall erfolgt in der Regel über mehrere dynamisch gekoppelte Kontaktpunkte und Richtungskomponenten. Auch wenn Matrixformulierungen vorhanden sind, mit welchen die übertragene Leistung unter Einbeziehung aller Komponenten berechnet werden kann, scheitert diese Methode in der Praxis an der Größe der Eingangsdatensätze. Weiterhin können Matrixinversionen zu fehlerhaften Prognosen führen. Das Ergebnis der Prognose, welches im Ausgang als Einzahlwert vorliegt, schmälert zudem den physikalischen Einblick in den Übertragungsprozess und erschwert somit Verbesserungsmaßnahmen direkt an der Quelle und somit an der wirksamsten Stelle (primäre Schallschutzmaßnahmen). Auf die Matrixformulierung aufbauend können die in Abbildung 2 dargestellten Anforderungen an effiziente Quellenbeschreibungsmethoden definiert werden.

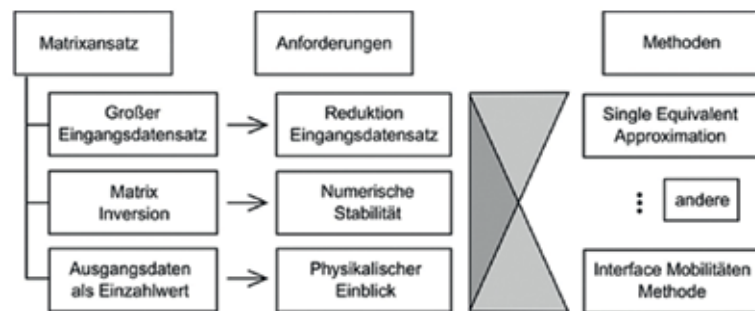


Abb. 2: Schematische Übersicht der Methoden im Vergleich

Von praktisch höchster Relevanz für den schiffbaulichen Planungsbetrieb ist die Reduktion der erforderlichen Eingangsdatensätze. Dieses Ziel wird von der Methode der Single Equivalent Approximation primär verfolgt, welche zur Beschreibung der Subsysteme auf Einzahlwerte zurückgreift. Da der Ansatz jedoch eine starke Vereinfachung erfordert, leidet der physikalische Einblick. Dieser ist wünschenswert, um Verbesserungsmaßnahmen an der Quelle und am Fundament effizient beurteilen zu können. Hierfür erscheint die Methode der Interface-Mobilitäten am besten geeignet, welche auf den Fourier-Transformierten der Eingangsgrößen beruht und somit einen intuitiven Einblick in den Übertragungsprozess bietet. Beide Methoden wurden hinsichtlich der Anwendbarkeit für schiffbautypische Quelleninstallationen untersucht und entsprechend den Anforderungen der Werftindustrie weiterentwickelt. Hierbei ist vor allem die Weiterentwicklung der Methoden für elastisch gelagerte Quellen, wie z. B. Antriebsmotoren, zu nennen.

Neben der Entwicklung von Methoden zur praxistauglichen Beschreibung von Quellen mit mehreren Kontaktpunkten bestand eine weitere Fragestellung in der Bedeutung nicht-vertikaler Richtungskomponenten. Die Vernachlässigung von Richtungskomponenten ermöglicht eine signifikante Vereinfachung der Quellenbeschreibung. Dennoch muss jede Vereinfachung auf

physikalisch fundierter Basis erfolgen, da andernfalls keine zuverlässigen Prognosen zu erwarten sind. Es wurden daher Fallstudien zur Untersuchung des Einflusses der Momentenanregung bei versteiften Plattenstrukturen sowie zur Bedeutung der translatorischen Komponenten bei der Schallanregung durch Antriebsmotoren durchgeführt. Die vorgeschlagenen vereinfachten Methoden wurden zudem hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf linienförmig starr gekoppelte Quellen und Empfänger erfolgreich getestet, wobei die Kontaktstelle zwischen Quelle und Empfänger mittels räumlichen Samplings diskretisiert wurde. Zusammenfassend wurde eine Anwendbarkeit mit verwertbarer Genauigkeit beider Methoden für die benannten Quellkonfigurationen und Richtungskomponenten festgestellt. Weiterer Forschungsbedarf besteht jedoch insbesondere hinsichtlich der kombinierten Anregung durch mehrere Richtungskomponenten. Detaillierte Ergebnisse finden sich z.B. in [10][11].

### Möglichkeiten der Quellbeschreibung: Antriebsstrangmodellierung

An Bord von Schiffen stellen Verbrennungsmotoren die relevantesten Körperschallquellen dar, welche als Folge des Verbrennungsprozesses Schwingungen in den Rumpf einleiten. Die Hauptmaschine leitet Anregungskräfte in das Fundament und Drehmomente in den Antriebsstrang ein. Die daraus resultierenden Drehschwingungen wiederum induzieren Körperschall in Getriebe, Kupplung und anderen Teilen des Antriebsstrangs. Eine genaue Kenntnis dieser wichtigen Quellen erhöht daher die Prognosegenauigkeit erheblich. Zur Beschreibung der Schallerregung durch Komponenten im Antriebsstrang wurden im Rahmen von EPES daher detaillierte Simulationsverfahren entwickelt, wobei der Fokus der durchgeführten Arbeiten auf der Hauptantriebsmaschine lag. Hierfür wurden ein parametrisches Motormodell aufgebaut und numerische Simulationen durchgeführt. Untersucht wurden der Körperschalleintrag ins Schiffsfundament sowie die Torsionsschwingungen im Antriebsstrang. Das modular aufgebaute Gesamtmodell besteht aus Struktur- und Anregungsmodellen und beschreibt die Anregungen durch die Aggregatlager in das Schiffsfundament und die Torsionsschwingungen im Antriebsstrang, die in den weiteren Komponenten Körperschall induzieren. Dabei wird das Strukturmodell des Antriebsstrangs als n-Massen-Torsionsschwinger und die Hauptmaschine als Starrkörper mit sechs Freiheitsgraden abgebildet.

Abbildung 3 zeigt die Prinzipskizze der Hauptmaschine, wobei die dynamischen Aggregatlagerkräfte in Orange und die dynamischen Torsionsmomente am Wellenausgang in Grün dargestellt sind. Die Eigenschaften der Aggregatlager wurden mittels idealer Feder-Dämpfer-Elemente nachgebildet. Zusätzlich zur Strukturdämpfung im Antriebsstrang wurde die durch den Propeller eingeleitete Dämpfung berücksichtigt.

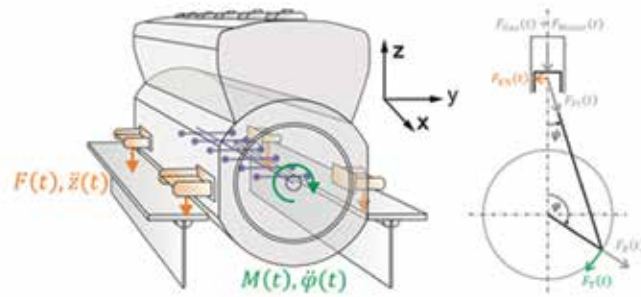


Abb. 3: Prinzipskizze einer Hauptantriebsmaschine (links) und Kräfte am Kurbeltrieb (rechts)

Das Anregungsmodell zur Berechnung der dynamischen Kräfte am Kurbeltrieb basiert auf dem Tangentialdruckverlauf  $p_t(t)$  eines als repräsentativ angenommenen Zylinders und lautet

$$p_t(t) = \sum (\rho \cdot a_k(n(t)) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{T} k \cdot \varphi(t) - \varphi_0\right) + (\rho \cdot b_k(n(t)) + \mu \cdot b_m(n(t)) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{T} k \cdot \varphi(t) - \varphi_0\right)) .$$

Durch harmonische Analyse werden gemessene Druckverläufe in Sinusschwingungen zerlegt und die Koeffizienten  $a_k(p_{mi})$  und  $b_k(p_{mi})$  der Fourierreihe bestimmt. Mithilfe dieser Daten werden Polynome berechnet, welche die aus Messwerten abgeleiteten Koeffizienten interpolieren. Somit kann der tangential Zylinderdruck, in Abhängigkeit von einer beliebig vorgegebenen Drehzahl  $n(t)$  oder von einem Drehwinkel  $\varphi(t) = \int 2\pi \cdot n(t) dt$ , berechnet werden. Durch Vorgabe der Anfangswinkel werden  $\varphi_0$  der Zündzeitpunkt und die Zündfolge berücksichtigt, mit  $\rho$  können Zündaussetzer definiert und mit  $\mu$  der Einfluss der Massenkräfte ein- und ausgeschaltet werden. Mit den in [12] angegebenen Gleichungen werden für jeden Zylinder die resultierenden Kräfte am Kurbeltrieb (siehe Abbildung 3) berechnet. Für die Propelleranregung wurde ein ähnliches Vorgehen gewählt, wobei aber nur die Sinusanteile der ersten zwei Ordnungen berücksichtigt wurden. Die resultierenden Anregungsmomente sind abhängig von der Anzahl der Propellerblätter und vom statischen Antriebsmoment.

Zur Berechnung der dynamischen Aggregatlagerkräfte ist es notwendig, die mechanische Admittanz des Fundaments, die Massenträgheitsmomente der Hauptmaschine sowie die Positionen der Lager zu kennen. Diese Werte können, sofern sie nicht von den Werften oder Motorenherstellern zur Verfügung gestellt werden, auch mit experimentellen Methoden bestimmt werden. Die Anregung des Motorblocks erfolgt über die sogenannten freien Momente um die Längsachse des Motors (x-Achse, vgl. Abbildung 3). Diese berechnen sich durch die Gleichung  $M(t) = \sum_i F_{KN,i}(t) \cdot b_i(t)$  mit den zeitlich verän-

derlichen Abständen der Massenschwerpunkte der Kolben und des Motorblocks  $b_i(t)$  sowie den Kolbennormalkräften  $F_{KN,i}$ . Das Berechnungsmodell des Motorblocks ist auf die Starrkörperschwingungen beschränkt.

### Schallausbreitung und -abstrahlung im Schiffskörper: Statistische Energie-Analyse (SEA)

Mit den beschriebenen Ansätzen zur Quellbeschreibung ist die Anregung der Schiffsstruktur bekannt, so dass nun die resultierenden Schwingungen ermittelt werden können. Für die breitbandige Vorhersage des Schwingungsverhaltens von Schiffen sind dabei deterministische Methoden, wie z.B. die FEM, ungeeignet. Selbst mit der heute verfügbaren Rechenkapazität stößt die FEM für sehr große Strukturen bereits bei wenigen hundert Hertz an die Grenze der Praktikabilität. Werden deterministische Methoden dennoch bei hohen Frequenzen angewendet, so ergeben sich mit wachsender Frequenz zunehmende Abweichungen. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Resultate mit steigender Modenzahl immer stärker von kleinen Änderungen der betrachteten Geometrie, den Randbedingungen und der Dämpfung abhängen. Einen Ausweg bietet hier die SEA, welche eine statistische Aussage über das zeitlich gemittelte Schwingungsverhalten erlaubt. Bei der SEA wird die komplexe Struktur eines Schiffes in eine Anzahl kleinerer Teilsystemen aufgeteilt (z.B. versteifte Platten oder Räume), welche miteinander gekoppelt sind. Jedes der Teilsysteme kann durch eine Energiequelle (Körper- oder Luftschallquelle) angeregt werden, und die Körperschallenergie kann sich durch das gesamte System ausbreiten. Durch Aufstellen und Lösen des die Energiebilanz beschreibenden Gleichungssystems wird die Energie in jedem Subsystem berechnet, woraus die mittlere Schnelle (Platten) oder der Schalldruck (Räume) bestimmt werden kann. Das Prinzip der SEA wird in Abbildung 4 veranschaulicht.

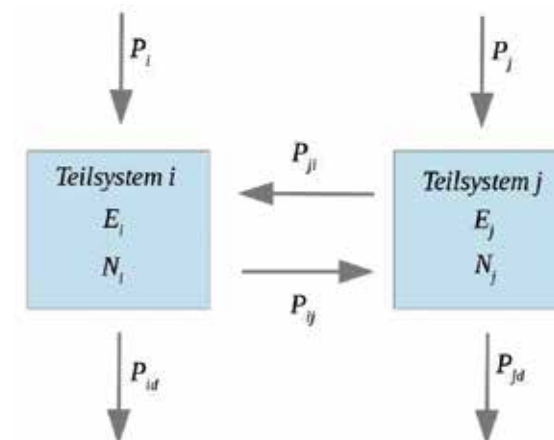


Abb. 4: Veranschaulichung des Prinzips der Statistischen Energie-Analyse

Jedes Teilsystem  $i, j$  besitzt dabei eine Modenanzahl  $N_i, N_j$  und eine Energie  $E_i, E_j$  pro Terz- oder Oktavband. Ferner existieren die Energiezuflüsse sowie  $P_i, P_j$  die Energiesenken  $P_{id}, P_{jd}$ . Der Energiefluss zwischen den Systemen wird über  $P_{ij}, P_{ji}$  beschrieben. Bei der Anwendung der SEA sind neben der Modenanzahl die Kopplungsverlustfaktoren zwischen den Subsystemen sowie die Verlustfaktoren der Subsysteme selbst, welche aus deren physikalischen Eigenschaften berechnet werden können, von großer Bedeutung. Subsysteme bestehen in der Praxis aus hoch versteiften Plattenstrukturen, deren Biegesteifigkeit viel höher als die einer unversteiften Platte ist. Da Versteifungen eher die Modenverteilung als die Modendichte beeinflussen, kann bei einer Schätzung der Modenanzahl das Modell einer isotropen Platte zugrunde gelegt werden. Für diese wird eine angepasste Biegesteife verwendet, welche dem geometrischen Mittel der Biegesteifen der orthotropen Platte entspricht. Vergleiche zwischen Berechnung und Messungen in Bezug auf Kopplungsverlustfaktoren haben die Zuverlässigkeit dieses Vorgehens bestätigt. Die Kopplungsverlustfaktoren können aus dem Transmissionsgrad berechnet werden, wobei der Transmissionsgrad aus dem Wellenansatz resultiert. Zusammengesetzte Strukturen weisen wesentlich höhere Verlustfaktoren auf als ihre Einzelelemente. Die Annahme eines Verlustfaktors, welcher sich umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Frequenz verhält, wurde für schiffbautypische Stahlstrukturen als angemessen identifiziert. Der Einfluss der Schallabstrahlung auf die Verlustfaktoren wurde durch die Berechnung des Abstrahlgrades berücksichtigt. In Bezug auf Letzteren ergaben verschiedene Modelle zur Berechnung des Abstrahlgrades ähnliche Ergebnisse. Die Berechnung des Abstrahlgrades kann nach DIN EN 12354 vorgenommen werden. Es wurde ein vollständiges SEA-Modell implementiert, welches die Berechnung der Körperschallverteilung in den Platten und des Luftschalls in den Empfangsräumen (ohne Betrachtung von Sekundärmaßnahmen, wie z. B. Vorsatzschalen) ermöglicht. Da die Modellierung komplexer Schiffsstrukturen auch mittels SEA eine große Anzahl an Eingangsdaten erfordert und damit sehr zeitaufwändig ist, wurde zudem ein vereinfachtes SEA-Modell implementiert, welches die erforderlichen Eingangsdaten auf die Hauptübertragungspfade zwischen Quelle und Empfänger reduziert. Dabei kann jeweils ein Übertragungspfad zwischen einer Quelle und einer Empfangsplatte betrachtet werden. Ergebnis ist die mittlere Schnelle der Empfangsplatte. Die implementierten SEA-Modelle wurden an zwei Beispielen, dem Deckshaus-Mock-up der Wehrtechnischen Dienststelle in Kiel sowie einer RoPax-Fähre, getestet und mit Messungen verglichen. Es konnte eine gute Übereinstimmung beider SEA-Modelle festgestellt werden, welche insbesondere angesichts der deutlichen Datenreduktion als akzeptabel erachtet werden kann.

## Schallausbreitung und -abstrahlung im Schiffskörper: Energie-Finite-Elemente-Methode (EFEM)

Für die akustische Berechnung großer Strukturen kann neben der SEA weiterhin die noch vergleichsweise junge EFEM angewandt werden. Ausgehend von einer Leistungsbilanz, bei der die Eingangsleistung als Summe aus dissipativer Leistung und dem Leistungsfluss über den Rand jedes Testvolumens dargestellt wird, kann analog zur Wärmeleitung die Grundgleichung der EFEM in differenzieller Form hergeleitet werden. Charakteristische Parameter sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Frequenz und die Dämpfung. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

- Umformung der Größen in zeitlich und räumlich gemittelte Energiedichten
- Approximation durch ebene Wellenfunktionen
- Geringe Dämpfung
- Äquivalenz der zeitlich und räumlich gemittelten kinetischen und potenziellen Energie

Bei der Berechnung der Energieverteilung komplexer Strukturen wird die Geometrie aufgrund geometrischer Eigenschaften in diskrete Subsysteme unterteilt. Diese werden mittels der EFEM-Basisgleichung beschrieben, und der Energiefluss zwischen den Subsystemen wird mittels Transmissionskoeffizienten erfasst. Diese Art der Modellierung berücksichtigt sowohl Struktur-Struktur- als auch wechselseitige Fluid-Struktur-Kopplungen. Die in Abbildung 5 (links) dargestellte Schiffbaustruktur mit einer rechteckigen Grundplatte von 1,6 m x 1,85 m x 45 mm ist für einen strukturdynamischen Vergleich von EFEM und klassischer FEM untersucht worden. Mit einer um den Faktor 20 reduzierten Anzahl an Freiheitsgraden konnte das gezeigte EFEM-Modell gegenüber der FEM vergleichsweise grob diskretisiert werden. Für eine Anregung von 2 kHz sind in Abbildung 6 die Ergebnisse von FEM und EFEM für die Biegewellen entlang des Symmetrieschnittes auf der Grundplatte gegenübergestellt. Trotz der deutlich geringeren Anzahl von Freiheitsgraden und der kürzeren Berechnungszeit erlaubt die EFEM hier eine gute räumlich gemittelte Vorhersage der Energiedichteverteilung mit einer Abweichung von maximal 1,3 dB [13].



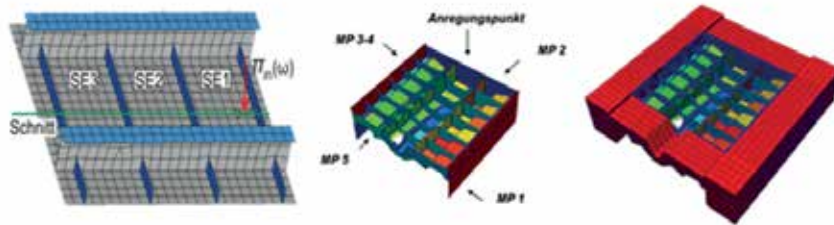


Abb. 5: Schiffsstruktur (links) und Motorfundament (rechts)

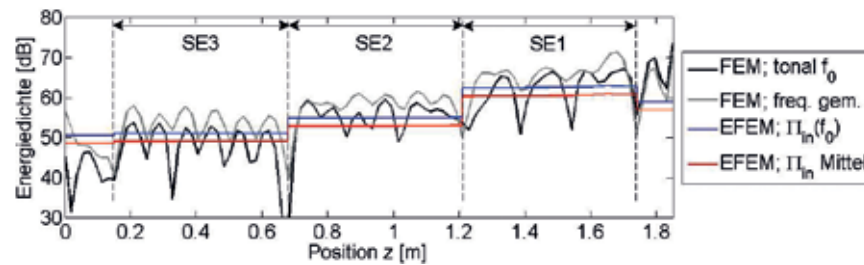


Abb. 6: FEM- und EFEM-Ergebnis der Schiffsstruktur im Symmetrieschnitt

Im Vergleich zur SEA können mit der EFEM auch komplexe Strukturen detailliert aufgelöst werden. Das Motorfundament in Abbildung 5 (rechts) besteht aus verschweißten Aluminiumplatten mit Dicken von 3 mm bis 12 mm. Am Anregungspunkt wird mit einem Shaker eine Rauschanregung in die Struktur eingeleitet. Das Fluid wurde nur an den äußeren Seitenwänden modelliert und ist an den Rändern mit einer Freifeldrandbedingung versehen. An fünf Messpunkten MP 1-5 wurde mit einer Microflow-Sonde Druck und Schnelle im Fluid gemessen. Für den Vergleich zwischen Messungen und Berechnung wurden alle Messpunkte im Fluid gemittelt und der berechneten mittleren Energiedichte gegenübergestellt, da die mit der EFEM berechnete Energiedichte eine über eine Wellenlänge und eine Periode gemittelte Größe ist. Der Vergleich zwischen Messungen und Simulation für die vibro-akustische Analyse der detaillierten Struktur ist in Abbildung 7 dargestellt und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Diese konnte auch in weiteren Untersuchungen bestätigt werden [14], sodass abschließend eine Prototypensoftware zur EFEM-Berechnung erstellt wurde, mit der vibro-akustische Berechnungen versteifter Plattenstrukturen auf Basis klassischer FE-Gitter beliebiger Geometrie möglich sind.

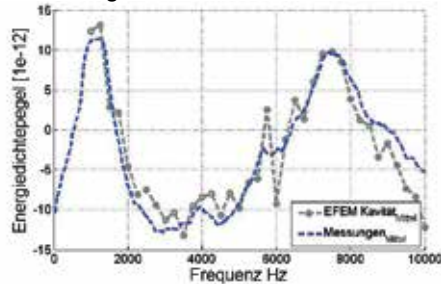


Abb. 7: Vgl. von Messung und EFEM-Berechnung für das Motorfundament

## Validierung der Verfahren an Prüfständen und auf Messfahrten

Die entwickelten Verfahren wurden im Verlauf des EPES-Projektes fortwährend mit unterschiedlichsten Messungen auf Prüfständen und auf Probefahrten validiert. So wurden hinsichtlich der Quellmodellierung u.a. umfangreiche Vergleichsmessungen zur Kalibrierung der Antriebsstrang-Modelle auf einem skalierten Versuchsstand des Fraunhofer LBF durchgeführt, der aus einem Verbrennungsmotor, einem Rotor und einer Wirbelstrombremse besteht und modular zu einem gesamten Antriebsstrangmodell zusammengesetzt werden kann (Abb. 8, links). Neben stationären Betriebsbedingungen konnten damit auch transiente Ereignisse wie beispielsweise Zündaussetzer und Hochläufe des Motors untersucht werden. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 8 (rechts) für einen exemplarisch ausgewählten Punkt auf der Grundplatte des Motors dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die angeregten Frequenzen und Amplituden sehr gut übereinstimmen.

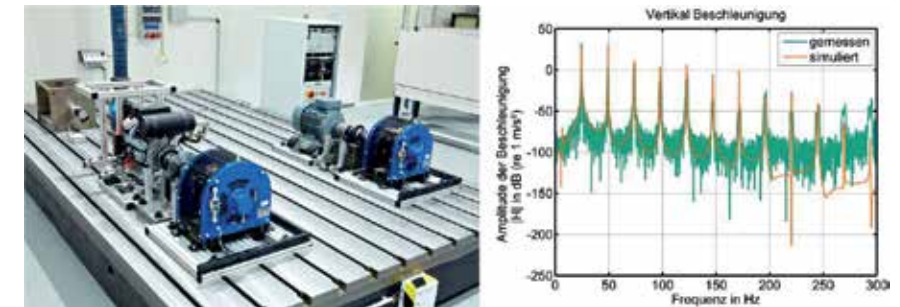


Abb. 8: Skalierter Antriebsstrang-Versuchsstand (links) und gemessene sowie simulierte Beschleunigungen (rechts)

Zum Abgleich der energiebasierten Berechnungsverfahren wurden weiterhin verschiedene Prüfstandsmessungen zur Bestimmung der Transmissionskoeffizienten von Schweißverbindungen hinsichtlich Transmission und Reflexion von Körperschall untersucht, um einen Vergleich zwischen analytisch ermittelten und gemessenen Transmissions- und Reflexionskoeffizienten durchführen zu können. Zur Validierung der Vorhersage der Körperschallausbreitung wurde neben Messungen an einfachen Ausschnitten von Schiffstrukturen u.a. auch eine experimentelle Modalanalyse an einem komplexen Motorfundament (Abb. 9) durchgeführt. Zusätzlich wurde die Schallabstrahlung mit Mikrofonen und einer Microflow-Sonde untersucht (siehe auch Abb. 7).

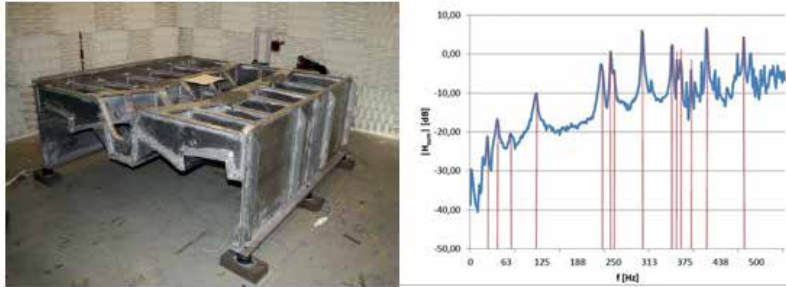


Abb. 9: Motorfundament und zugehörige Übertragungsfunktion

Neben unterschiedlichen weiteren Messungen an Teilstrukturen, wie z. B. am Deckhaus-Mock-Up in Kiel, fanden im letzten Viertel des Projektes schließlich detaillierte Vergleiche zwischen den Berechnungsmodellen für reale Schiffe und Probefahrtmessungen statt. So wurde u.a. auf der Probefahrt einer RoRo-Fähre der FSG die Körperschallübertragung mit einem Cluster von Beschleunigungssensoren ausgehend vom Motor und anderen Schallquellen über die gesamte Fähre gemessen und die Luftschallpegel an verschiedenen Stellen des Schiffes aufgezeichnet. Für die Vorhersage und die Beurteilung der Schiffsakustik anhand der Berechnungsmodelle wurden die erarbeiteten und verwendeten Methoden schließlich sequenziell miteinander zu einer Gesamtprozesskette aus Schallentstehung, Schallausbreitung und Abstrahlung/Dämmung/Wahrnehmung verknüpft. Die rote Kurve in Abbildung 10 zeigt beispielhaft das Ergebnis der SEA-Berechnungen für eine Standardkabine mit Fenster auf der RoRo-Fähre. Bei der schwarzen Kurve handelt es sich um die Messwerte in dieser Kabine. Es ist jeweils der A-bewertete Schalldruckpegel dargestellt.

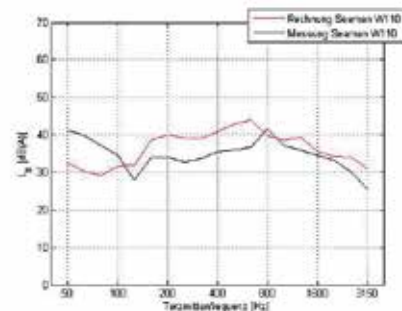


Abb. 10: Vergleich des Kabinen-Schalldruckpegels auf einer RoRo-Fähre aus SEA-Gesamtsimulation und Probefahrt-Messung

Die tendenziellen Kurvenverläufe zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Da unterhalb von 100 Hz die wesentlichen Voraussetzungen für die Anwendung der SEA nicht erfüllt werden, sind tieffrequente Abweichungen zwischen Rechnung und Messung zu erwarten und plausibel. Die Summenpegeldiffe-

renz zwischen Rechnung und Messung beträgt 2,6 dB und erfüllt somit das Kriterium einer gewünschten konservativen Vorhersage.

## Integration der Verfahren in die Softwareumgebung der Werften und Einsatz des Prognosewerkzeuges für neue Schiffsprojekte

Aufgrund der Leistungsfähigkeit der entwickelten Ansätze und Berechnungsmodelle wurden bei den beteiligten Werftpartnern große Anstrengungen unternommen, um entsprechende Schnittstellen in den jeweiligen werftinternen Softwareumgebungen zu schaffen, die eine Integration der Verfahren als neues Prognosewerkzeug in den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess erlauben. Mit Abschluss des Vorhabens stehen den Werften die Basisversion des EPES-Prognosewerkzeuges sowie ein deutlich verbessertes Datenmanagement für Akustikdaten zur Verfügung. Beides wird bereits bei Schallprognosen für neue Schiffsprojekte eingesetzt. Das modular aufgebaute Werkzeug vereinigt die oben umrissenen Berechnungsmethoden zur Beschreibung schalltechnischer Vorgänge wie Schallerregung / Schallübertragung, Schallausbreitung und Schallabstrahlung unter einer konfigurierbaren graphischen Oberfläche und bietet in der aktuellen Ausbaustufe Grundfunktionen zur Datenvisualisierung und Verwaltung. Über eine integrierte Makrosprache kann der Anwender Berechnungsfunktionen anpassen und zusätzliche Funktionen erstellen. Mit einem interaktiven Modelleditor kann die Berechnungskette des zu untersuchenden Anwendungsfalls als Blockdiagramm visualisiert und Eingangsgrößen und Zwischenergebnisse in jedem Element editiert und angezeigt werden (Abb. 11).

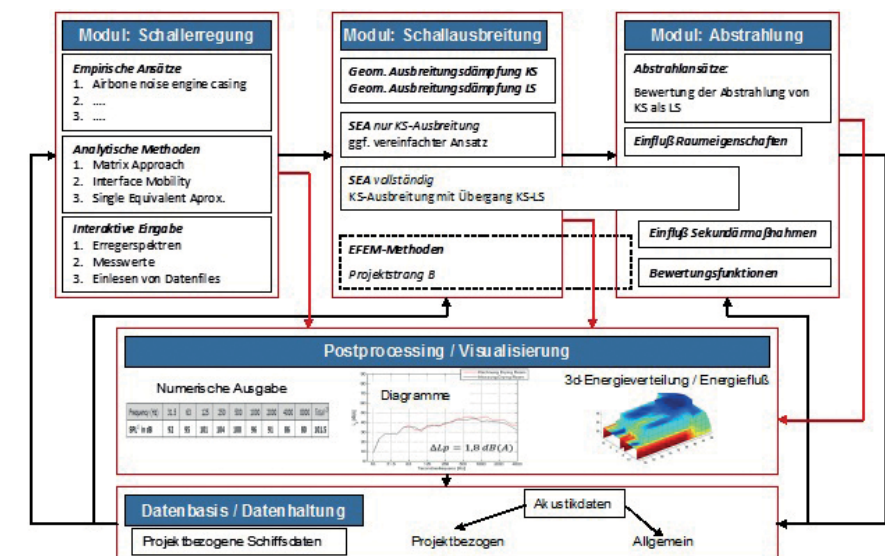


Abb. 11: Struktur des EPES-Prognosewerkzeuges

Die enge Zusammenarbeit der Werften mit den Forschungsinstituten vermittelte allgemein ein tiefes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge. Bei der Beschränkung auf die Anwendung kommerzieller Schallprognosetools wären diese verborgen geblieben. Durch dieses Verständnis und die entwickelten theoretischen Verfahren wurde bei den Werften konkretes Optimierungspotenzial erschlossen. Dieses floss bereits während der Vorhabenslaufzeit in die Optimierung des Produktes "Schiff" ein. Beispielhaft stellt Abbildung 12 dies für das Optimierungspotenzial an Schiffsfundamenten von Geräuscherzeugern dar. Bei diesem realen Projekt konnte der Körperschalleintrag weiter reduziert und so das Verbesserungspotenzial der neuen Vorhersagemethoden nachgewiesen werden. Damit stieg der akustische Komfort bei vernachlässigbaren Kosten.

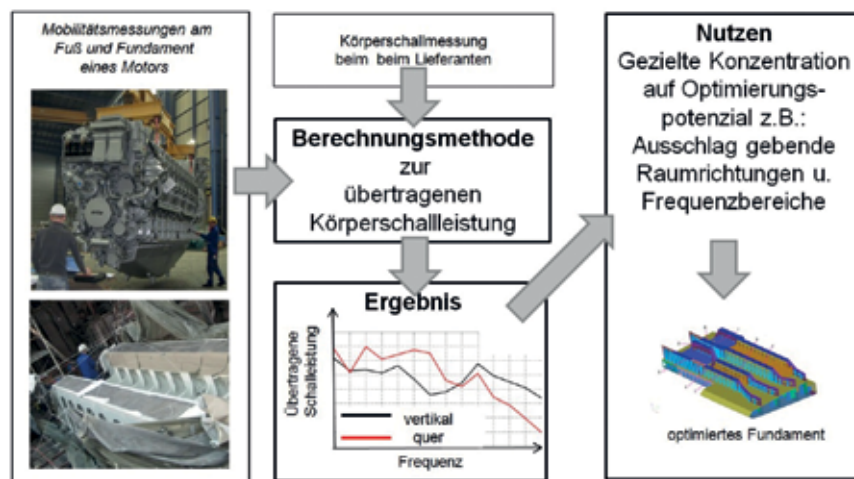


Abb. 12: Ermittlung des Optimierungspotenzials eines Schiffsfundaments

Verbesserte Prognosemethoden zum Trittschall mündeten im Vorhabensverlauf in einer deutlich gezielteren und kostengünstigeren Umsetzung der Kundenanforderungen. So konnten bei einem Neubau 20 t Dämpfungsbelag eingespart werden. Weiterhin flossen wichtige Erkenntnisse zur Prognose des von Schiffsfenstern abgestrahlten Schalls bei neuen Yachtprojekten ein. Eine Präsentationssoftware für Höreindrücke wurde erstellt, welche erstmals in der Konstruktion von Yachten zur Anwendung kam. Weiterhin wurden Lagerungskonzepte für Hauptgeräuscherzeuger auf aktuellen Yachtprojekten gemäß der gewonnenen Erkenntnisse ausgelegt. Schallpegelreduktionen um bis zu 5 dB werden für die entsprechenden Schiffe erwartet. Auf einem weiteren Gebiet stellte sich heraus, dass mit dem Einsatz verschiedener numerischer Berechnungsverfahren ein Tor für die Anwendung der EFEM im Schiffbau aufgestoßen wurde. Erste Vergleiche zwischen Berechnungen und Messungen zeigen gute Übereinstimmungen, die vielversprechend für kom-

mende Anwendungen in der Praxis sind. Konkret sollen die Erkenntnisse in die Auslegung der Lagerung eines neuen Aggregates einfließen, um sie bezüglich der Wasser- und Körperschallpegel zu optimieren.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorhersage und Optimierung der Schiffsakustik spielt aufgrund strenger werdender gesetzlicher Regelungen und steigender Anforderungen seitens der Auftraggeber eine zunehmend wichtigere Rolle im Entwurfs- und Konstruktionsprozess. Insbesondere sind effiziente Simulationswerkzeuge notwendig, die mit vergleichsweise geringem Aufwand bereits in der Angebotsphase eine aussagekräftige Prognose der zu erwartenden Schalldruckpegel erlauben. Für diesen Zweck wurden im Rahmen des Projektes EPES von den beteiligten Partnern aus Forschung und Werftindustrie verschiedene Ansätze zur Quellbeschreibung, Schallausbreitung und Schallabstrahlung entwickelt. Anhand von unterschiedlichsten Vergleichsmessungen auf Versuchsständen und auf Probefahrten konnte eine umfangreiche Validierung der Berechnungsverfahren vorgenommen werden.

Gemeinsam mit den Forschungspartnern haben die Werften im Rahmen von EPES umfangreiche Entwicklungen, Versuche und Berechnungen durchgeführt, die im normalen Tagesgeschäft nicht möglich gewesen wären. In diese Entwicklungen, Versuche und Berechnungen flossen Erkenntnisse ein, die aus der Zusammenarbeit der Partner im Konsortium resultierten. Ein so breit gefächelter fachlicher Austausch auf diesem hohen Niveau war nur im Verbund möglich. Um die erfolgreich implementierten Verfahren zu verfeinern, ihre Funktionalität auszubauen und sie zur weiteren Umsetzung konkreter Produktverbesserungen einzusetzen, sind daher nachfolgende Projekte geplant.

## Literatur

- [1] International Maritime Organization: Resolution MSC. 337 (91) – Adoption of the Code on Noise Levels on Board Ships, 2012.
- [2] International Maritime Organization: Resolution A.468 (XII): Code on Noise Levels on Board Ships, 1981.
- [3] Germanischer Lloyd: Harmony Class - Rules on Rating Noise and Vibration for Comfort, Cruise Ships ( $v \leq 25$  kn), 2003.
- [4] Det Norsk Veritas: Rules for Classification of Ships: Comfort Class, 2010.
- [5] Bureau Veritas: Rules for the Classification of Steel Ships NR467: Additional Requirements for Passenger Ships greater or equal to 65 m in length, 2010.



- [6] Maschke, C.; Jakob, A.: Psychoakustische Messtechnik. In Möser, M. (Hrsg.). Messtechnik der Akustik. Springer Verlag, S. 599-600, 2010.
- [7] Genuit, K. et al.: Bewertung von Fahrzeuggeräuschen. In Genuit, K. (Hrsg.). Soundengineering im Automobilbereich. Springer Verlag, S. 118-119, 2010.
- [8] Deutsches Institut für Normung: DIN 45631 – Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit. Beuth Verlag, 1991.
- [9] Badino, A. et al.: Criteria for Noise Annoyance Evaluation on Board Ships. In Rizzuto, E., Guedes Soares, C. (Hrsg.). Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources. Taylor&Francis, S. 971-980, 2012.
- [10] Mathiowetz, S.; Bonhoff, H.A.: Interface mobilities for characterization of structure-borne sound sources resiliently mounted via multiple contact points. Journal of Sound and Vibration 332, S. 5789-5803, 2013.
- [11] Mathiowetz, S.; Bonhoff, H.A.: Approximate description of structure-borne sound sources with continuous line-shaped contact interfaces. Tagungsband der AIA-DAGA 2013, Meran, S. 2227-2230, 2013.
- [12] Hafner K. E.; Maass H.: Theorie der Triebwerksschwingungen der Verbrennungskraftmaschine. Springer-Verlag, 1984.
- [13] Stritzelberger, B.; von Estorff, O.: Die Energie-Finite-Elemente-Methode zur Anwendung im Schiffbau. Tagungsband der DAGA 2014, Oldenburg, S. 391-392, 2014.
- [14] Karger, M.; von Estorff, O.: Schallabstrahlung mit der Energie-Finite-Elemente-Methode. Tagungsband der DAGA 2014, Oldenburg, S. 393-394, 2014.

## ReFIT – Refitting Ships for Improved Transport Efficiency

Förderkennzeichen: 03SX319

Mattia Brenner (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam)  
 Stefan Harries (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam)  
 Stefan Wunderlich (FRIENDSHIP SYSTEMS GmbH, Potsdam)

### Ziele des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben ReFIT adressierte die Umrüstung von Schiffen in Fahrt zur Verbesserung ihrer Energieeffizienz. Das Vorhaben konzentrierte sich auf die hydrodynamischen Verbesserungspotenziale unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Überlegungen. Hierzu hat sich ein europäisches Konsortium mit vier Partnern aus Frankreich, Deutschland, Schweden und Spanien gebildet, das Reedereikompetenz (ACCIONA), hydrodynamisches Know-how (SSPA), Expertise im Computer Aided Engineering (FRIENDSHIP SYSTEMS) sowie schiffbauliche Beratung und Projektmanagement (METTLE) zusammenführte. Das Verbundvorhaben ERA-NET MARTEC Call 2010 - ReFIT beschreibt die übergeordneten Ziele und Arbeitszusammenhänge innerhalb des Konsortiums. Die wesentlichen Gesamtziele des Vorhabens waren:

- Die Identifikation der wichtigsten (kritischen) Technologien zur Verbesserung der Energieeffizienz von Schiffen in Fahrt.
- Die Entwicklung einer systematischen Herangehensweise zur Beurteilung der Energieeffizienz und ihrer Verbesserungspotenziale.
- Die exemplarische Umsetzung vorgeschlagener Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz für ausgewählte Schiffe als repräsentative Vertreter bestimmter Schiffstypen.

Das nationale Teilvorhaben ReFIT-CAE wurde von dem deutschen Projektpartner FRIENDSHIP SYSTEMS bearbeitet. Die spezifischen Ziele von ReFIT-CAE waren folgende:

- Methodischer Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz von Schiffen in Fahrt (Quantifizierung des Istzustands, des besten Sollzustands sowie eines realisierbaren Zustands durch Umrüstung anhand von Praxisbeispielen).



- Entwicklung von Visualisierungsverfahren für viskose Strömungsfelder mit besonderem Fokus auf den Vergleich von Varianten.
- Vereinfachung und Verkürzung von Prozessen des Simulation-driven Designs funktionaler Flächen unter Berücksichtigung viskoser Strömungsphänomene als Schlüsseltechnologie zur Verbesserung von Schiffen in Fahrt (hierdurch Erhöhung des Anwenderkreises und verstärkte Nutzung, etwa auf Reparaturwerften).

## Einleitung

95% aller Güter werden über die Meere transportiert. Die Welthandelsflotte umfasst etwa 95 000 größere Einheiten. Oftmals wird ein Produktlebenszyklus von 20 bis 30 Jahren angenommen. Etwa 3000 Schiffe werden pro Jahr ersetzt; hinzu kommen Neubauten zur Befriedigung des wachsenden Transportvolumens. Dreiviertel der sich im Betrieb befindenden Schiffe sind mehr als 15 Jahre alt. Diese Schiffe wurden zu einem Zeitraum entwickelt, in dem die Energieeffizienz sowohl ökonomisch als auch umweltpolitisch eine untergeordnete Rolle spielte. Bei einer weltweiten Transportleistung von über 5,5 Milliarden Tonnenkilometer pro Jahr werden jährlich rund 350 Millionen Tonnen Brennstoff eingesetzt (8,5% des globalen Erdölverbrauchs). Während für die Betreiber der Brennstoffverbrauch einen immer größeren Anteil an den Gesamtkosten darstellt, der so weit wie möglich reduziert werden soll, ist für die Gesellschaft die Verringerung von Treibhausgasen von vorrangigem Interesse. Die Verbesserung der Energieeffizienz ist daher ein gemeinsames Anliegen von Industrie und Politik.

Neben einer Optimierung von Neubauten, die i.d.R. bessere Chancen zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs pro Tonnen-Meile Ladung aufweisen als vergleichbare Schiffe in Fahrt, rückt aufgrund der großen Anzahl existierender Schiffe auch deren nachträgliche Verbesserung in den Fokus, selbst wenn die möglichen Erfolge begrenzter Einzelmaßnahmen geringer ausfallen. Betriebswirtschaftlich betrachtet können bereits kleine prozentuale Verbesserungen der Energieeffizienz eine Um- oder Nachrüstungsmaßnahme und die damit verbundenen Investitionen rechtfertigen, die beispielsweise während eines erweiterten Dockings (z. B. Einbau einer vorbereiteten Düse) oder im Zusammenhang mit einer notwendigen Reparatur (z. B. Bugwulsterersatz) realisiert werden kann.

Das europäische Verbundvorhaben ReFIT sollte sich auf die hydrodynamischen Verbesserungspotenziale von Schiffen in Fahrt fokussieren. Dabei sollten die vielversprechendsten Technologien hinsichtlich betrieblicher und wirtschaftlicher Kriterien untersucht werden. Vier Ansätze wurden dabei verfolgt:

- Nachträgliche Optimierung von Teilen des existierenden Rumpfs
- Ersatz bestehender Anhänge sowie Einführung zusätzlicher Elemente
- Anpassung oder Austausch von Propulsoren
- Veränderung des Betriebsprofils

Während die Entwurfsphase eines neuen Schiffes insbesondere zu Beginn einen großen Freiraum für Entwurfsentscheidungen, die die Leistungsfähigkeit des Schiffes positiv beeinflussen, bietet, sind die Freiheiten beim Finden von Nachrüstlösungen für existierende Schiffe um ein Vielfaches kleiner. In diesen Fällen besteht eine Vielzahl von Beschränkungen, die von physisch/geometrischer über wirtschaftlicher bis hin zu regulatorischer Natur reichen. Da die Entscheidung zu einem Umbau insbesondere vom Return-of-Investment (ROI) bestimmt ist, ist die Genauigkeit der Abschätzung des Verbesserungspotenzials, und damit die Anforderung an die entsprechenden Berechnungen, von besonders hoher Bedeutung. Die Anwendung von Optimierungsverfahren kann in diesem Kontext eine wirtschaftlich nicht tragbare Lösung zu einer wirtschaftlich lohnenswerten Lösung umwandeln.

Durch das Projekt ReFIT sollte eine systematische Vorgehensweise zur Evaluierung der Verbesserungspotenziale erarbeitet werden. Anhand ausgewählter Beispiele sollten Kosten-Nutzen Beziehungen entwickelt werden, vielversprechende Um- und Nachrüstungsvarianten numerisch untersucht und experimentell verifiziert werden. Durch systematische Optimierung sollten mögliche Verbesserungen nach hydrodynamischen Kriterien (z. B. Widerstand, Gleichförmigkeit des Nachstroms) und betriebswirtschaftlichen Indikatoren (z. B. Amortisierungszeit unter Annahme zu erwartender Ölpreisentwicklung) quantifiziert werden.

Innerhalb dieses Konsortiums konzentrierte sich FRIENDSHIP SYSTEMS auf die Entwicklung von Methoden und Systemen des Simulation-driven Designs als besonderer Zweig des Computer Aided Engineering (CAE). Beim simulationsgetriebenen Entwurf werden Verfahren des Computer Aided Design (CAD) und der Computational Fluid Dynamics (CFD) eng miteinander verbunden, um bestmögliche Formen im Sinne der Geometrie zu identifizieren.

Abbildung 1 illustriert diesen Prozess: Ausgangspunkt ist die Formulierung gewünschter Eigenschaften (Performance). Auf Grundlage einer geometrischen Instanz (Modeling) werden die aktuellen Produkteigenschaften bestimmt (Simulation), insbesondere durch eine numerische Strömungsberechnung. Anschließend wird über einen formalen Mechanis-

mus, etwa eine Explorationsstrategie als Teilmenge mathematischer Optimierungsverfahren, eine neue Produktinstanz, d.h. eine neue Variante, erzeugt. Der Prozess wird wiederholt bis die erreichte Performance der gewünschten (annähernd) entspricht, keine weitere Verbesserung mehr erreicht werden kann oder die gewählte maximale Anzahl von Varianten untersucht wurde.

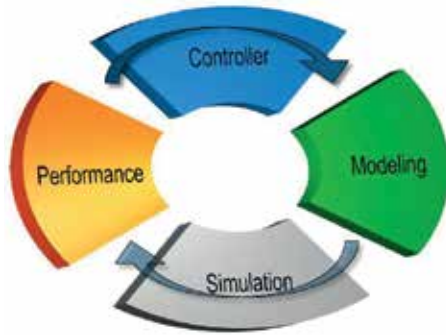


Abb. 1: Prozess des Simulation-driven Design

Während das Simulation-driven Design auf Grundlage potentialtheoretischer Simulationen, insb. zwecks Reduktion des Wellenwiderstands im Glattwasser, als etablierter Stand-der-Technik betrachtet werden kann, stellt der Einsatz viskoser CFD-Verfahren weiterhin verhältnismäßig große Anforderungen an das Expertenwissen des Anwenders (z.B. Generierung hochwertiger Gitter) sowie an die Rechnerressourcen (insb. innerhalb einer Optimierung mit hoher Anzahl von Varianten). Neben der reinen Verfügbarkeit der notwendigen Verfahren – mathematische Geometriebeschreibung, stabile Lösung der Reynolds-Averaged Navier Stokes Gleichungen (RANS), leistungsfähige Rechner, geschlossene Prozesskette – besteht hinsichtlich der Anwendungsunterstützung und geeigneten Nutzerführung für viskose Optimierungsaufgaben weiterhin noch ein sehr deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

FRIENDSHIP SYSTEMS hat mit seinem CAE-System CAESES / FRIENDSHIP-Framework (kurz CAESES) die Voraussetzungen geschaffen, dass das Simulation-driven Design heute in verschiedenen Produktentwicklungsphasen regelmäßig und effizient eingesetzt werden kann. Potentialtheoretische Optimierungen können so mittlerweile auch von Entwurfsingenieuren durchgeführt werden. Die Lösung viskoser Optimierungsprobleme ist indes solange noch Simulationsexperten vorbehalten – und verlangt somit einen sehr hohen Personaleinsatz – bis die software-technischen Voraussetzungen für eine gute Handhabung geschaffen sind. Hierzu gehört neben dem schnellen Aufsetzen einer Optimierungsaufgabe vor allem die geeignete und systematische Auswertung von Ergebnissen. Viskose Simulationen liefern

Felddaten (Zustandsgrößen des Drucks, der Geschwindigkeit, der Turbulenz), die sowohl nachbereitet (etwa in Form integraler Gütekriterien für die quantitative Bewertung) als auch visualisiert (meist in ebenen Schnitten oder auf gekrümmten Randflächen) werden müssen. Vor allem der Vergleich von Varianten erfordert hierzu angemessene Formen der Visualisierung, denn im Optimierungszusammenhang entstehen erhebliche Datenmengen, die einfach zugänglich zu machen (schnelle interaktive Arbeit) und gut aufzubereiten sind (automatisiertes Reporting).

Ziel von FRIENDSHIP SYSTEMS war es daher innerhalb des deutschen Teilvorhabens ReFIT-CAE die Zugänglichkeit viskoser Strömungsberechnungen und deren Ergebnisse für das Simulation-driven Design wesentlich erhöhen. Hierfür erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit der schwedischen Schiffbauversuchsanstalt SSPA als Konsortialpartner. SSPA setzt für den hydrodynamischen Entwurf vor allem das CFD-System SHIPFLOW des schwedischen Softwareherstellers FLOWTECH ein. Das viskose Modul SHIPFLOW CHAPMAN zeichnet sich durch robuste Gittergenerierung und kurze Rechenzeiten (aufgrund von Overlapping Grid Technologien) bei guten Simulationsergebnissen aus. Die Verbesserungen der viskosen Optimierungsmethoden sollten anhand von systematischen Um- und Nachrüstungsuntersuchungen zu Schiffen in Fahrt entwickelt und beispielhaft an einer vertieften Integration von CHAPMAN in CAESES aufgezeigt werden.

### Optimierung von Nachrüstlösungen

Innerhalb des ReFIT Projektes wurden seitens FRIENDSHIP SYSTEMS mögliche Nachrüstlösungen für zwei verschiedene Schiffe untersucht. Diese Fälle sind in Detail in den Publikationen [Brenner et al. 2013] und [Guimaraes et al. 2014] dargestellt.

In Zusammenarbeit mit der am Verbundvorhaben beteiligten Reederei Acciona Transmediterranea wurde ein Versuchsträger ausgewählt. Hierbei handelt es sich um die Schwesterschiffe Fortuny und Sorolla. Diese RoPax Fähren wurden im Jahr 2001 von der Reederei in Betrieb genommen und hatten damit in etwa die Hälfte der von Acciona veranschlagten Lebensdauer von 20 Jahren hinter sich. Die Schiffe wurden bereits in der Vergangenheit mit CLT Propellern nachgerüstet, haben, im Vergleich zu anderen Schiffen der Reederei, jedoch einen relativ hohen EEDI (theoretisch im Nachhinein errechnet). Aufgrund der nicht zu kurzen Restlebensdauer und wegen des Vorhandenseins eines Schwersterschiffes, stellt diese RoPax-Fähre einen geeigneten Kandidaten für die Entwicklung und Optimierung von Retrofitlösungen. Die Schiffe fahren im Service vom spanischen Festland zu und zwischen den Balearen.



Abb. 2: RoPax-Fähre Fortuny der Reederei Acciona Transmediterranea.

Ein weiterer Grund für die Betrachtung von Nachrüstlösungen ergab sich aus der Betrachtung statistischer Betriebsdaten. Sowohl die Schwimmlage, als auch insbesondere die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit weichen deutlich von den Entwurfsbedingungen ab. Im Falle der Geschwindigkeit ergab sich dies dadurch, dass in der Regel aus Treibstoffersparnisgründen nur 3 der 4 vorhandenen Hauptmaschinen zum Einsatz kommen. Aus den gesammelten statistischen Daten für Tiefgang, Trimm und Geschwindigkeit wurden die jeweiligen Durchschnittswerte gebildet und als neue Entwurfsbedingungen für die Ermittlung sinnvoller Retrofitlösungen angenommen.

Für die folgende Optimierung der Energieeffizienzlösungen wurden drei Aufgaben mit steigender Komplexität festgelegt:

- Optimierung der Bugwulstgeometrie mit potentialtheoretischen Rechnungen. Die Zielfunktion sollte hier der Wellenwiderstand sein.
- Optimierung der Wellenböcke über Ausrichtung, Twist und Profilform mit viskosen Rechnungen. Ziel dieser Optimierung sollte die Steigerung der Nachstromqualität sein, um einen möglichst homogenen Zustrom zum Propeller zu gewährleisten.
- Optimierung der Anordnung eines Pre-Swirl Stators (PSS), der durch einen Vordrall der Strömung die Drallverluste am Propeller minimieren soll. Zielfunktion dieser Optimierung sollte direkt die Propulsionsleistung sein und der Propeller wurde als Lifting Line Modell in die Rechnungen einbezogen, das den benötigten Schub und das zugehörige Drehmoment iterativ einstellt.

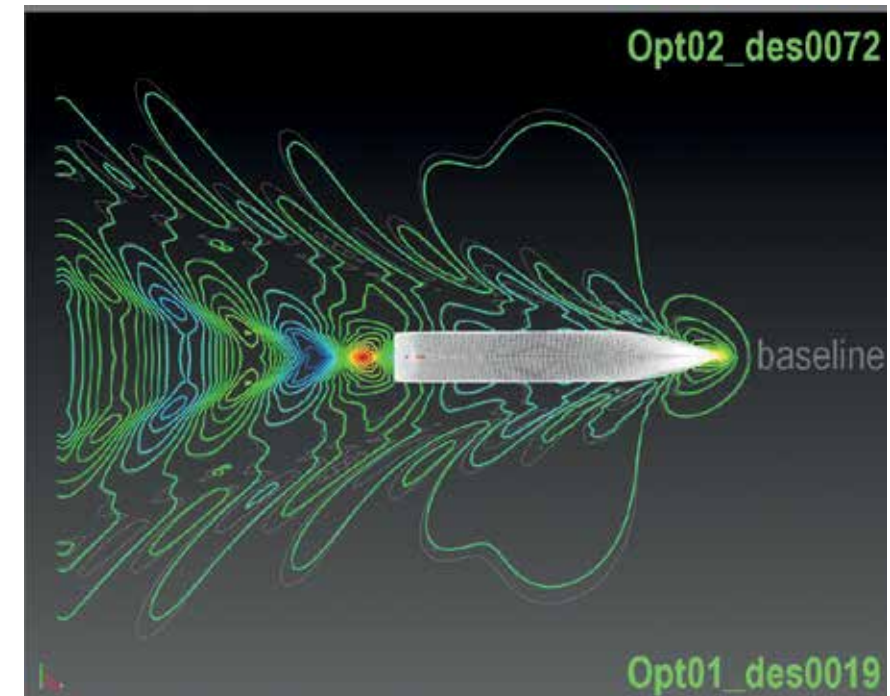


Abb. 3: Wellenbilder ausgewählter Varianten (bunte Isolinen) im Vergleich mit der Baseline (graue Isolinen).

Die optimierte Bugwulstgeometrie zeigte eine Wellenwiderstandsverringern von etwa 4%, die sich allerdings mit nur 0,4% Verbesserung im Gesamtwiderstand widerschlägt. Der Reibungswiderstand war gegenüber der Baseline erhöht. Die Wellenbilder zeigten ein deutlich verringertes Bugwellensystem, das den vorgenannten Sachverhalt, widerspiegelt. Die Anordnung und Optimierung der Wellenbockarme und des PSS, führten ebenfalls zu keiner deutlich größeren Verbesserung. Gegenüber der Originalvariante betrug die Einsparung jeweils etwa 1% der Propellerdrehleistung. Es konnte insgesamt festgestellt werden, dass die untersuchten Nachrüstlösungen zwar zu einer Verbesserung des Leistungsbedarfs des Schiffes führen, jedoch nicht ausreichend, um die Investition in diese Umbauten zu rechtfertigen.

Über die bisher beschriebenen Untersuchungen an der RoPax-Fähre hinaus, wurde eine weitere Studie im Bereich des Retrofittings durchgeführt. In diesem Fall handelte es sich um eine moderne 50m Motoryacht mit einem hybriden Rund-/Knicksanterrumpf, Bugwulst, zwei Propellern und einem zentralen Skeg. Aufgrund von Materialänderung und zusätzlichen Einbauten hatte sich der Tiefgang nach Abschluss der Bauphase nennenswert gegenüber dem Entwurfsmaß vergrößert. Bei Probefahrten wurde daraufhin wenig überraschend festgestellt, dass die Zielgeschwindigkeit nicht erreicht werden



konnte und dass zusätzlich die Propellerbelastung so weit erhöht war, dass nur ein temporäres Klassezertifikat ausgestellt werden konnte. Die durch den vergrößerten Tiefgang bedingten hydrodynamischen Auswirkungen sollten durch einen grundlegenden Ansatz adressiert und kompensiert werden.

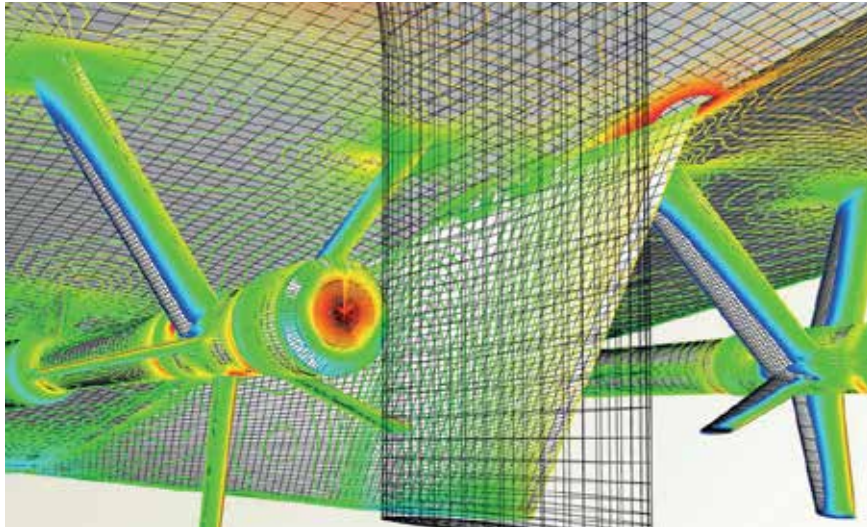
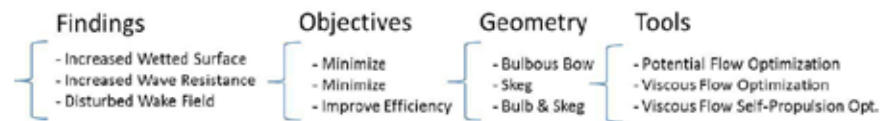


Abb. 4: Druckverteilung auf dem Rumpf und den Anhängen für die beste Variante des PSS.

Die Gründe für die schlechte Performance wurden zunächst der vergrößerten benetzten Oberfläche, einem durch die Tiefertauchung des Bugwulstes vergrößerten Wellenwiderstand und einem allgemein gestörten Zustrom zu den Propellern zugeschrieben. Während auf die erste Ursache relativ schnell logisch gefolgert werden konnte, bedurfte es bei den zwei anderen einer tiefergehenden Untersuchung. Dafür wurden viskose Strömungssimulationen bei dem ursprünglichen und dem aktuellen Tiefgang durchgeführt. Basierend auf diesen Voruntersuchungen wurde eine geeignete Strategie für den Optimierungsprozess der Retrofittinglösungen ermittelt:



In dieser Studie wurde ein zweistufiger Optimierungsansatz angewandt. Der erste Schritt beinhaltete die individuelle Optimierung unterschiedlicher Anhängen mit geeigneten Rechenmethoden, während der zweite Schritt die kombinierte Optimierung der ausgewählten besten Formen aus dem ersten Schritt beinhaltete, mit einem finalen numerischen Propulsionsversuch.

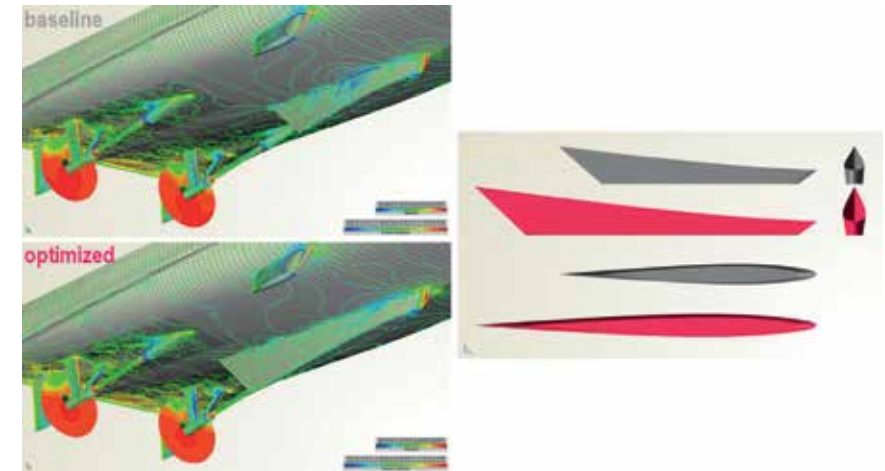


Abb. 5: Vergleich der Druckfelder auf dem Rumpf und den Anhängen (l.). Originale und modifizierte Skeggeometrie.

Die Verringerung des Treibstoffbedarfs der Hauptmaschinen durch die optimierten Retrofittinglösungen wurde, basierend auf den numerischen Propulsionsversuch auf etwa 16% abgeschätzt. Unter Berücksichtigung des Einsatzradiuses und der Durchschnittsgeschwindigkeit des Schiffs ergaben sich für die Ersparnis zwischen optimiertem und nicht optimiertem Entwurf in etwa 70 000 €/10 000 nm. Für die Betrachtung der Ergebnisse unter umwelttechnischen Gesichtspunkten, wurden die relevanten EEOI Werte berechnet. Für einen gegebene Fahrt zwischen Piräus und Nizza mit einer Länge von 1260 nm und einer konstanten Geschwindigkeit von 15,4 kn, betrug der EEOI des bestehenden Schiffes 34,4 und für das Schiff mit den optimierten Anhängen 29,2 Einheiten. Die Berechnung des EEOIs für die Motoryacht basierte auf der von der IMO empfohlenen Formel, wobei die Zuladungsmenge durch die Bruttotonnage ersetzt wurde.

$$EEOI = \frac{(Fuel \times CO2 \text{ Conversion Factor})}{(Cargo \text{ Quantity} \times Distance)}$$

Durch eine hypothetische Einsatzanalyse für eine komplette Sommersaison wurde abgeschätzt, dass die Verwendung der optimierten Anhängen an diesem Schiff zu einer Verringerung des gleitenden Durchschnitts des EEOIs um bis zu 25% führen würde.



## Wissenschaftliche Visualisierung

Im Bereich der wissenschaftlichen Visualisierung wurde die Verarbeitung von Rechenergebnissen in CAESSES grundlegend strukturell verändert. Der objektorientierten Struktur der Software zufolge werden die Ergebnisse nun als Objekte geladen, z. B. 3D Gitter im Fall von dreidimensionalen Feldern. In den Felddaten sind über die Gitterkoordinaten hinaus Metadaten wie Drücke, Geschwindigkeiten usw. gespeichert. Auf diese Ergebnisobjekte können dann Visualisierungsobjekte angewendet werden, die alle Einstellungen für die entsprechende Visualisierung enthalten. Auf ein Ergebnisobjekt können mehrere Visualisierungen (gleichzeitig) angewendet werden und ein Visualisierungsobjekt kann für mehrere Ergebnisobjekte verwendet werden, was zu hoher Flexibilität und Wiederverwendbarkeit führt.

Grundsätzlich gehören vier Bestandteile zu diesem Visualisierungskonzept: Ergebnisobjekte (3-, 2- oder 1D Felder), Prozessoren, die daraus Felder extrahieren, die eine Dimension kleiner sind (z.B. 2D Schnitt aus 3D Feld), Visualisierungen, die auf die verschiedenen Feldtypen angewandt werden können (z.B. Contour Plot für 2D Felder) und verschiedene Viewer in denen die jeweiligen Daten dann dargestellt werden.

Die verwirklichten Visualisierungsobjekte und Prozessoren basieren allesamt auf den Visualization Toolkit (VTK) Bibliotheken und decken den gesamten Bereich an Visualisierungstypen ab, den man bei den meisten kommerziell erhältlichen Postprozessoren findet. Unter anderem stehen folgende Optionen wie Contour Plots, Vektor Plots, Stromlinien, Schnitte auf Gitter- oder Raumebenen und Isoflächen und -linien zur Verfügung. Aufgrund der Anwendung innerhalb des Projektes, wurden die neuen Visualisierungsmöglichkeiten zunächst speziell für die Auswertung von Ergebnissen des CFD Löser Shipflow, die im CGNS Format vorliegen, entwickelt. In einem nächsten Schritt wurden die Entwicklungen verallgemeinert und zusätzlich neue Importe für das native Ergebnisformat von OpenFOAM, für das Tecplot Datenformat, sowie für das Ensight Format implementiert.

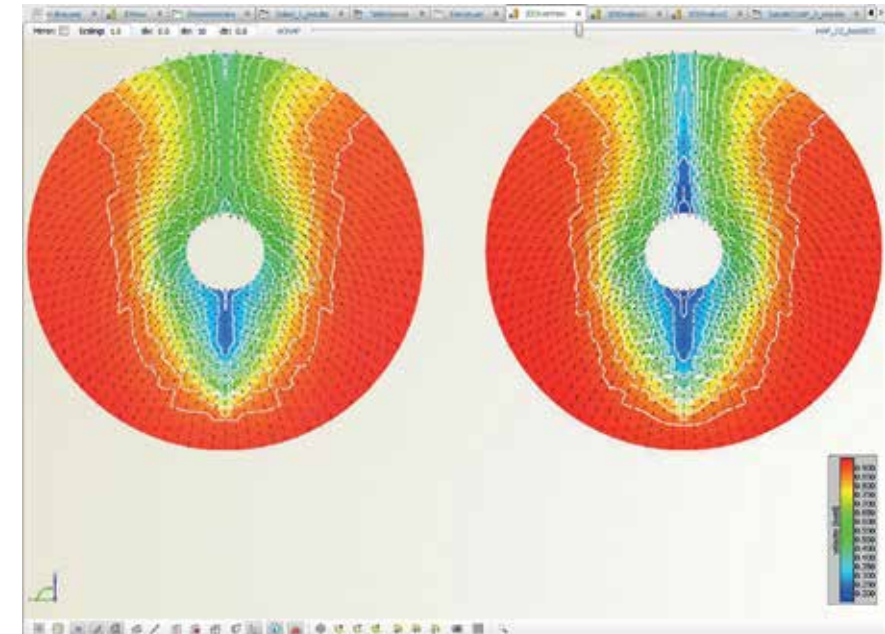


Abb. 6: Vergleich der Nachstromfelder für zwei Varianten. In diesem Fall wurde eine der Visualisierungen gesperrt und transliert. In der zweiten Bildhälfte kann nun das Ergebnis einer zweiten Variante geladen werden. Der Schieberegler am oberen Bildrand steht auf Mittelstellung, es werden also beide Ergebnisse dargestellt.

Bis zu diesem Punkt deckten die neu implementierten Entwicklungen die wichtigsten und am meisten verwendeten Funktionalitäten kommerzieller Visualisierungstools (sowohl eigenständiger, als auch als Teil eines integrierten CFD Systems) ab. Darüber hinaus sollte, wie in den Zielen der Projekts festgelegt, ein spezieller Fokus auf das Vergleichen von Varianten aus Variationen und Optimierungen gelegt werden. Ein erster Schritt dazu war, dass die Visualisierungseinstellungen global für das Ergebnis einer bestimmten Rechnung gesetzt werden. Ist diese Rechnung mit den zugehörigen Ergebnissen in verschiedenen Varianten vorhanden, kann man sich auf einfache Weise durch die Varianten klicken und bekommt unmittelbar die entsprechenden Ergebnisse im Grafikfenster dargestellt.

Um die Ergebnisse verschiedener Varianten direkt miteinander vergleichen zu können, wurde zusätzlich dazu neue Funktionalität implementiert. Bisher war es nur möglich eine Variante zu sperren, die gleichzeitig an der Y-Ebene gespiegelt wurde. In der zweiten Bildhälfte konnten dann zum Vergleich die Ergebnisse von einer anderen Variante geladen werden. Unter anderem ergab diese Beschränkung Schwierigkeiten im Falle von Rechnungen, die kei-

ne Symmetrie an der Y-Ebene voraussetzen. Nun ist es möglich neben der Spiegelung beliebige Transformationen, wie Translation oder Skalierung, auf die gesperrten Ergebnisse anzuwenden (s. Abb. 6). Sie können auch exakt über die neu geladenen Ergebnisse gelegt werden. Ein stufenloses Überblenden über einen Schieberegler erlaubt dann einen verbesserten interaktiven und bildlichen Vergleich.

Speziell für die Auswertung und den Vergleich von Schiffsnachstromfeldern wurde ein neuer Prozessor eingeführt, der Wakefield Extractor. Dieser erlaubt das Auslesen der typischen Nachstromgeschwindigkeiten (Axial, Tangential- und Radialgeschwindigkeit) aus beliebigen X/Y/Z-Geschwindigkeitsfeldern. Weiterhin erlaubt er eine Betrachtung des Nachstroms „aus Sicht des Propellers“. Dies bedeutet, dass aus den berechneten Geschwindigkeiten, der Drehgeschwindigkeit des Propeller und einer optionalen Radialverteilung der geometrischen Anstellwinkel die Verteilung der effektiven Anstellwinkel (ohne durch den Propeller induzierte Geschwindigkeiten) über die Propellerkreisscheibe bestimmt und dargestellt wird. Im Gegensatz zu den oftmals betrachteten Geschwindigkeitskomponenten ist dies letztendlich das, was der Propeller tatsächlich von der Strömung nominell „sieht“ und was sein Verhalten bezüglich Effizienz, Vibrationen und Druckimpulsen bestimmt. Folgende Inputs werden vom Nutzer dafür gegeben:

- Propeller und Nabendurchmesser
- Propellerposition und Normale der Kreisfläche
- Auflösung in Umfangsrichtung und auszuwertende Radien
- Drehzahl und Drehrichtung
- Verteilung der geometrischen Anstellwinkel als Kurve über den normierten Radius
- Auswahl der Geschwindigkeitsvariablen aus dem auszuwertenden Feld und Normierung, wenn diese nicht bereits mit der Schiffsgeschwindigkeit normiert sind.

Auf dieses neu berechnete zweidimensionale Feld können nun beliebige geeignete Visualisierungen angewendet werden. Die Axialgeschwindigkeiten mit den Vektoren der Tangential- und Radialkomponente sind in Abbildung 6 dargestellt, Tangentialkomponente und effektive Anstellwinkel in Abbildung 7.

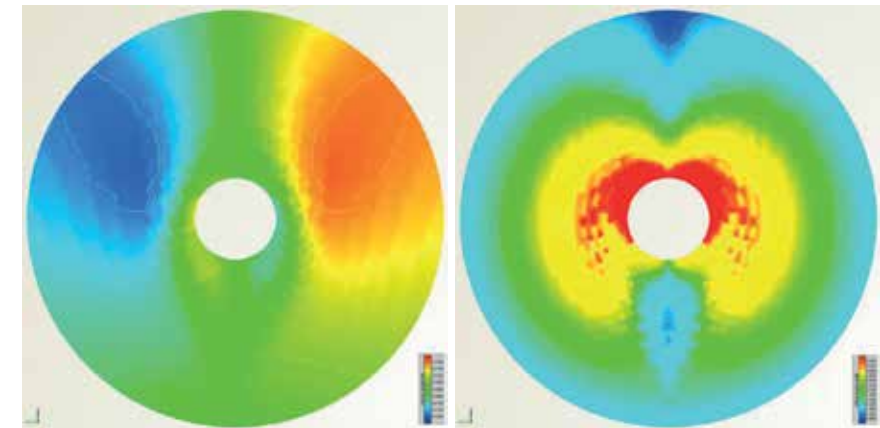


Abb. 7: Darstellung der Tangentialgeschwindigkeiten (l.) und der effektiven Anstellwinkel (r.) in der Propellerkreisscheibe.

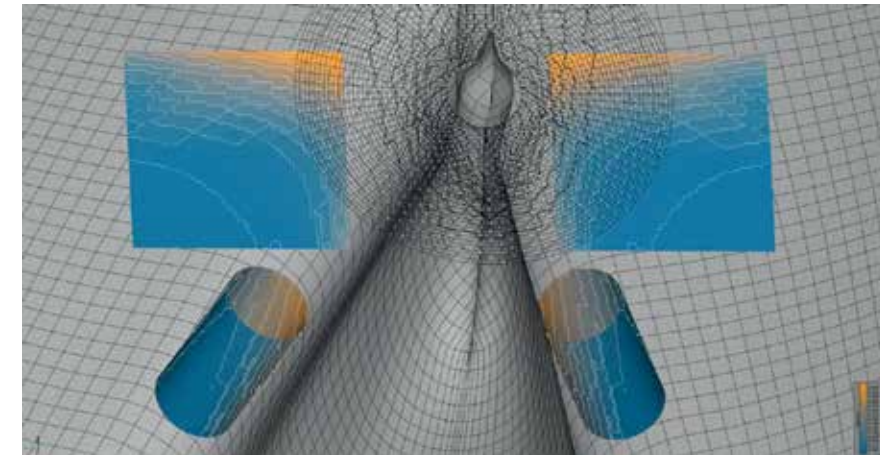


Abb. 8: Interpolation der X-Geschwindigkeit auf zwei verschieden geformte Flächen: Zylinder (unten) und Quadrat (oben).

Um bessere Vergleiche auch in anderen Bereichen der Strömung zu erlauben, wurde weiterhin die allgemeine Funktionalität eingeführt, Werte aus dreidimensionalen Feldern auf beliebig geformte zweidimensionale Felder zu interpolieren. Hier kann z. B. die Durchströmung einer bestimmten Fläche bestimmt werden. Da die Felder, auf die interpoliert wird, topologisch identisch sind, wird außerdem der Vergleich von Ergebnissen erleichtert, die auf ansonsten sehr unterschiedlichen Gittern vorliegen. Als Erweiterung ist hier vorgesehen, dass knotenweise die Differenz aus den Feldern verschiedener Varianten berechnet und dargestellt werden soll.

Für den Vergleich einer großen Anzahl von Varianten hinsichtlich ihrer Geometrie und Ergebnisse, wurde ein neuer Viewer implementiert, der sogenannte Design Viewer. Bislang war es in Gesamtübersicht für alle bei einer Variation oder Optimierung erstellten Varianten nur möglich die numerischen Werte im Design Result Viewer zu vergleichen. Dies sollte in ähnlicher Art auch für grafische Ergebnisse erlaubt werden.

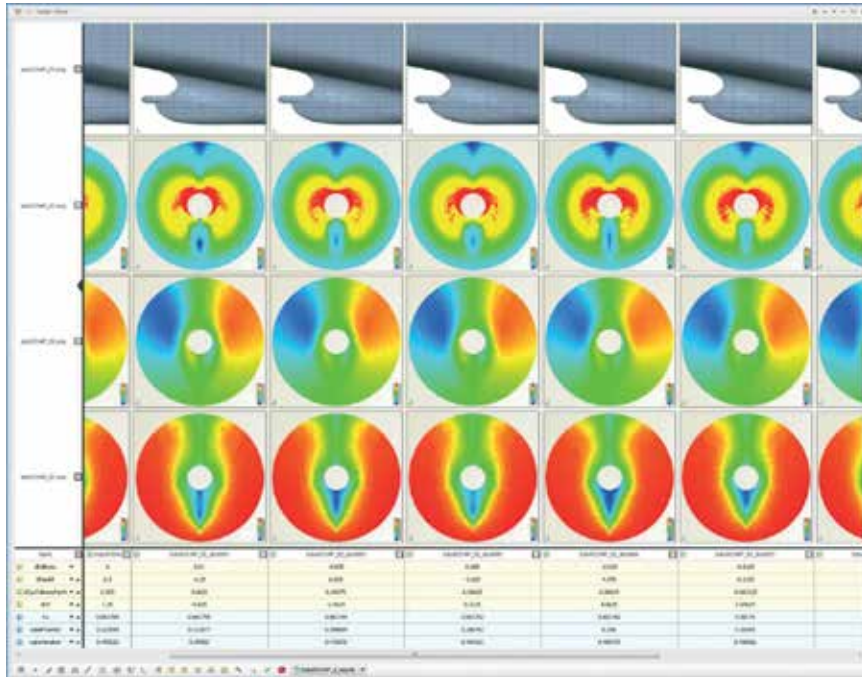


Abb. 9: Vergleich von Geometrie und Nachstromfeldern für eine Reihe von Varianten bei einer Variation der Hinterschiffsgeometrie.

Es können vor dem Start einer Variation Ansichten definiert werden, die für alle Varianten automatisiert erzeugt und abgelegt werden. Diese Screenshots können sowohl reine Geometrieansichten beinhalten, als auch Visualisierungen von Strömungssimulationsergebnissen. Der neue Viewer stellt zusätzlich zu den numerischen Ergebnissen (am unteren Bildrand) in einer Spalte pro Variante alle vorhandenen Screenshots dar. Es ergibt sich somit eine Matrixdarstellung aller vorhandenen Bilder (siehe Abb. 9). Die Größe der Bilder kann durch Rein- und Rauszoomen kontrolliert werden und es können Varianten oder Bilder (also Spalten oder Zeilen) aus der Matrix entfernt werden. Um die große Menge an Bilddaten handhaben zu können, werden die Bilder teilweise komprimiert und beim Scrollen durch die Matrix werden aufkommende Bilder im Hintergrund dynamisch geladen. Sollen im Nachhinein an den Variationslauf noch Bilder hinzugefügt werden, die nicht zu Beginn definiert wurden, ist es möglich diese nachträglich einzustellen.

Ein Automatismus läuft dann durch alle Varianten durch, erstellt die neuen Bilder entsprechend der Vorgaben und lädt diese in den Viewer. Zusätzlich zu reinen Bildern wird pro Variante noch eine komprimierte Beschreibung des Geometriemodells gespeichert, die ebenfalls als zusätzliche Zeile in den Design Viewer geladen wird. Hierdurch kann die Geometrie der Varianten auch dynamisch verglichen werden. Es kann also gedreht, verschoben und gezoomt werden.

## Fazit

Die Optimierungsstudien an verschiedenen Schiffen haben gezeigt, dass die Software auch im Bereich des Retrofittings angewendet werden und eine sichere Abschätzung darüber liefern kann, ob sich eine bestimmte Nachrüstlösung wirtschaftlich verwirklichen lässt.

Durch die Erweiterung der Postprocessing-Funktionalitäten wird der Leistungsumfang von CAESES als CAE Entwurfsplattform komplettiert. Weiterhin erlauben die neuen Funktionalitäten zum Vergleich von Varianten eine bessere Beurteilung der Performanceänderung, die sich durch Änderungen der Geometrie ergeben.

## Literatur

Optimization Using Viscous Flow Computations for Retrofitting Ships in Operation, Mattia Brenner, Vassilios Zagkas, Stefan Harries, Tobias Stein, 5th Conference on Computational Methods in Marine Engineering 2013 (MARINE), Hamburg, May 2013.

Retrofitting Vessels for Optimized Fuel Consumption, Helio Bailly Guimaraes, Mattia Brenner, Jose Manuel Fernandes Hernando, Sonsoles Jimenez Caballero, Stefan Harries, Matthias Maasch, 2nd International Symposium on Naval Architecture and Maritime 2014 (INT-NAM), Istanbul, October 2014

## Schriftenreihe Projektträger Jülich

1. **Technologie- und Erkenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Industrie**  
Eine explorative Untersuchung in der deutschen Material- und Werkstoffforschung  
hrsg. von A. Pechmann, F. Piller und G. Schumacher (2010), 230 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-624-8
2. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2010 (2010), 173 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-677-4
3. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2011 (2011), 227 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-745-0
4. **Statustagung Schifffahrt und Meerestechnik**  
Tagungsband der Statustagung 2012 (2012), 206 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-832-7
5. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2013 (2013), 188 Seiten  
ISBN: 978-3-89336-922-5
6. **Statustagung Maritime Technologien**  
Tagungsband der Statustagung 2014 (2014), 179 Seiten  
ISBN: 978-3-95806-006-7